

TECHNICKÁ UNIVERSITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojírenské technologie



Studijní program **M 2301** Strojní inženýrství
Studijní obor **23030T002** Strojírenská technologie

Zaměření
Strojírenská metalurgie

SLEDOVÁNÍ DILATACE SLITIN ZINKU PŘI JEJICH TUHNUTÍ

MONITORING DILATION ALLOYS ZINC IN THEIR FREEZING

Josef Vosáhlo

KSP –SM– 568

Vedoucí dipl. Práce. prof. Ing. Iva Nová, CSc.
Konzultant: Ing. Jiří Machuta, Ph.D.
Vedoucí katedry. prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Rozsah práce a příloh:

Počet stránek: 68

Počet tabulek: 24

Počet obrázků: 47

Počet příloh: 0

25.5.2012

Originální znění diplomové práce

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá dilatací při tuhnutí odlitku zinku Zn430. Bylo použito speciální zařízení, které umožňuje sledování hodnot dilatace a teploty při tuhnutí slitiny zinku Zn430. Tyto hodnoty byly pomocí snímací jednotky změřeny a zaznamenány do počítače. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách a v dané souvislosti vyneseny do grafů. V další části práce byly vyhodnoceny v dané závislosti vyneseny do grafů. V závěru diplomové práce jsou uvedeny výpočty a součinitele teplotní roztažnosti odlitku zinku Zn430.

Klíčová slova:

Dilatace, odlitek, zinek Zn430, teplota, teplotní roztažnost

Abstrakt:

The goal of this thesis is dilatation when the zinc Zn 430 alloy is setting up. The special equipment were used for monitoring of dilatation and temperature by Zn 430 setting up. Measured resources were acquired by special scanning device and loaded into PC. Data were used for creation of spreadsheets and diagrams. In the next part of thesis the data were evaluated. The end of the thesis deals with calculations and coefficient of thermal expansion of Zn 430 zinc alloy.

Key words:

Dilatation, casting, zinc Zn430, temperature, thermal expansion

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatněs použitím uvedené literatury.

Ve Veselské Lhotě 25.5.2012

.....

Josef Vosáhlo

Vysoké Veselí 50703

Veselská Lhota 50

Poděkování:

Děkuji prof. Ing. Ivě Nové, CSc. a Ing. Pavlu Pěničkovi za pomoc při tvorbě diplomové práce.

OBSAH

| | |
|--|----|
| Seznam použitých symbolů a zkratk | 7 |
| 1. ÚVOD | 8 |
| 2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE | 9 |
| 2.1 Charakteristika zinku a jeho slitin | 9 |
| 2.1.1 Čistý zinek | 9 |
| 2.1.2 Zinek a jeho slitiny | 12 |
| 2.1.3 Výroba odlitků ze slitin zinku | 25 |
| 2.2 Dilatační změny při tuhnutí odlitků | 29 |
| 2.2.1 Tuhnutí odlitků | 29 |
| 2.2.2 Objemové změny | 30 |
| 2.3 Fyzikální podstata teplotní roztažnosti kovů | 36 |
| 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST | 39 |
| 3.1 Charakteristika měřícího zařízení | 39 |
| 3.2 Příprava taveniny na experimentální část | 42 |
| 3.3 Postup provedeního experimentu | 44 |
| 3.4 Hodnocení výsledků měření | 46 |
| 3.4.1 Výpočet součinitele teplotní roztažnosti | 54 |
| 3.4.2 Zhodnocení výsledků | 62 |
| 4. DISKUSE VÝSLEDKŮ | 64 |
| 5. ZÁVĚR | 66 |
| 6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 68 |

Seznam použitých symbolů a zkratk

| | |
|------------------|--|
| b_f | Součinitel tepelné akumulace formy, $[W.m^{-2}.s^{-1/2}.K^{-1}]$ |
| C | Měrná tepelná kapacita, $[kg^{-1}.K^{-1}]$ |
| c_F | Měrná tepelná kapacita formy, $[J.kg^{-1}.K^{-1}]$ |
| d_{50} | Střední velikost zrna, $[mm]$ |
| l_V | rozměr odlitku po volné dilataci, $[m]$ |
| l_Z | Počáteční rozměr odlitku při teplotě, $T_{z.l.s}$ $[m]$ |
| m | Modul formovací CT směsi, $[-]$ |
| P | Tlak, $[Pa]$ |
| S | Plocha, $[m^2]$ |
| T | Čas, $[s]$ |
| T | Absolutní teplota, $[K]$ |
| T_F | Teplota formy, $[^{\circ}C]$, $[K]$ |
| T_{kr} | Teplota krystalizace $[^{\circ}C]$, $[K]$ |
| T_L | Teplota likvidu $[^{\circ}C]$, $[K]$ |
| $T_{lití}$ | Teplota lití, $[^{\circ}C]$, $[K]$ |
| T_O | Teplota okolí, $[K]$ |
| T_{op} | Teplotu okolního prostředí, $[K]$ |
| T_S | Teplota solidu, $[^{\circ}C]$, $[K]$ |
| T_t | Teplota tání, $[^{\circ}C]$, $[K]$ |
| $T_{z.l.s}$ | Teplota začátku lineárního smrštění, $[^{\circ}C]$, $[K]$ |
| V | Objem, $[m^3]$ |
| V_0 | Počáteční objem, $[m^3]$ |
| V_d | Objem dendritické pórovitosti, $[m^3]$ |
| V_{md} | Objem mezidendritické pórovitosti, $[m^3]$ |
| V_{st} | Objem soustředné staženiny, $[m^3]$ |
| V_{vd} | Objem vnitrodendritické pórovitosti, $[m^3]$ |
| ΔT | Teplotní změna, $[K]$ |
| ΔV | Objemová změna, $[m^3]$ |
| ΔV_L | Objemová změna odlitku v kapalném stavu, $[m^3]$ |
| ΔV_{L-S} | Objemová změna mezi teplotami T_L a T_S , $[m^3]$ |
| α | Součinitel délkového smrštění, $[K^{-1}]$ |
| Γ | Součinitel objemového smrštění, $[K^{-1}]$ |
| γ_S | průměrná hodnota γ v teplotním intervalu $T_L - T_S$, $[K^{-1}]$ |
| A | Šířka pórovitého pásma odlitku, $[m]$ |
| ε_V | Poměrná volná dilatace, $[-]$ |
| ε_B | bržděná tepelná dilatace, $[-]$ |
| λ | Součinitel tepelné vodivosti, $[W.m^{-1}.K^{-1}]$ |
| λ_F | Součinitel tepelné vodivosti formy, $[W.m^{-1}.K^{-1}]$ |
| P | Hustota, $[kg.m^{-3}]$ |
| ρ_F | Hustota materiálu formy, $[kg.m^{-3}]$ |
| \varnothing | Průměr, $[mm]$ |

1. ÚVOD

Zinek je z hlediska spotřeby čtvrtým průmyslově nejpoužívanějším kovem, po železe, hliníku a mědi. Využití a spotřeba stávajících zinkových slitin v poslední době intenzivně roste a jejich uplatnění se rychle rozšiřuje. Je to především díky poměru nízkých výrobních nákladů a vynikajících mechanických vlastností získaných odlitků. Tyto slitiny vytvářejí rovnocennou konkurenci ostatním výše zmíněným kovovým materiálům.

Vzhledem ke skutečnosti, že použití zinkových slitin intenzivně narůstá, začalo se i na katedře strojírenské technologie FS TUL v nedávné době experimentálními pracemi na téma zinkových slitin. Na téma sledování rozměrových změn při tuhnutí odlitků byla na KSP v průběhu minulých let provedena řada prací, které se zabývaly zkoumáním velkého množství slitin se zaměřením především do oblasti litin nebo slitin hliníku. S využitím zkušeností a poznatků z těchto prací je snahou pokračovat v této problematice i se zinkovými slitinami.

Úkolem této diplomové práce je sledování rozměrových změn při tuhnutí odlitků ze zinkových slitin a snaha pokusit se o rozšíření, nebo případné doplnění již získaných poznatků o těchto slitinách. Prozkoumáním těchto procesů a určením zjišťovaných charakteristik materiálu získáme možnost porovnat zinkové slitiny s ostatními, již prozkoumanými slitinami v oblasti týkající se rozměrových změn odlitků.



Obr. 1-1 Ukázka přesných odlitků zinkových slitin[12]

Diplomová práce vznikla v rámci řešení projektu studentské grantové soutěže označované na TUL 2822.

2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

2.1 Charakteristika zinku a jeho slitin

2.1.1 Čistý zinek [1]

Historický vývoj zinku lze datovat ve starověku, kdy se používal ve slitině s mědi jako mosaz a to již ve starověkém Egyptě okolo roku 1400 př.n.l. Mosaz se získávala tavením mědi se zinkovou rudou, kterou Řekové označovali jako cadmia - časem se z tohoto názvu vyvinul název kalamín, což je nejstarší známá zinková ruda.

Čistý zinek se podařilo pravděpodobně poprvé připravit ve 13. století v Indii. Odtud se tato znalost přenesla do Číny, kde se v období dynastie Ming v letech 1368 - 1644 používaly zinkové mince. V Evropě nebyla výroba zinku známa, a proto se zinek v 17. a 18. století dovážel z Číny loděmi nizozemské Východoindické společnosti.

První výroba zinku v Evropě započala na začátku 18. století v Anglii v oblasti Bristolu. Velmi rychle se započalo s výrobou také ve Slezsku a Belgii. Původ slova zinek není sice úplně jasný, ale nejčastější domněnka je, že byl odvozen od německého slova Zinke (v překladu bodec nebo zub) a to podle vzhledu kovu.

V zemské kůře je zinek poměrně bohatě zastoupen. Průměrný obsah činí kolem 100 mg/kg, čemuž odpovídá 76 ppm (parts per milion = počet částic na 1 milion částic). Tímto rozšířením v zemské kůře se řadí k prvkům jako je rubidium (78 ppm) a měď (68 ppm). I v mořské vodě je jeho koncentrace značně vysoká - 0,01 miligramu v jednom litru. Předpokládá se, že ve vesmíru připadá na jeden atom zinku přibližně 100 milionů atomů vodíku.

Hlavním minerálem a rudou pro průmyslovou výrobu zinku je sfalerit neboli blejno zinkové ZnS , v přírodě se v malém množství vyskytuje také další minerál se složením ZnS , avšak v jiné krystalové modifikaci známý jako wurtzit. Dalšími minerály zinku jsou smithsonit neboli kalamín uhličitý ZnCO_3 , kalamín křemičitý $\text{Zn}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, willemitt Zn_2SiO_4 , troosit $(\text{Zn}, \text{Mn})_2\text{SiO}_4$, zinkit neboli červená ruda zinková ZnO , franklinit $(\text{Zn}, \text{Mn})\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, zinečnatý spinel $\text{ZnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ a hemimorfit $\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2$. Vzácně se v přírodě můžeme setkat i s elementárním, kovovým zinkem.



Obr. 2-1 Sfalerit ZnS [11]

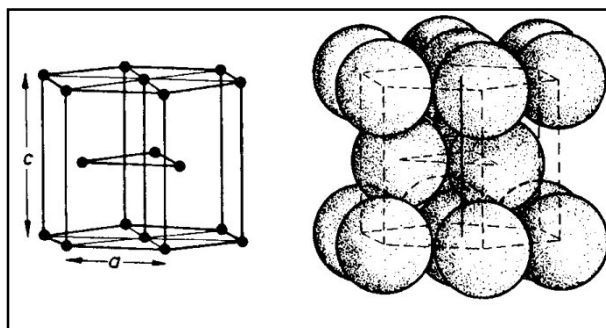


Obr. 2 -2 Sfalerit ZnS pod mikroskopem (primární zdroj zinku) [11]

Velká naleziště zinkových rud, zejména sfaleritu a smithsonitu, se nachází v Kanadě, Spojených státech amerických a Austrálii. Malá množství zinku bývají také přimíšena v železných rudách a při zpracování rud železa ve vysoké peci se hromadí v podobě zinkového prachu z kychtových plynů. Může to být 30 % i více, a proto se pro výrobu zinku vychází i z tohoto materiálu.

Čistý zinek je kov a je zabarven dohněda, žluta, červená, zelena i do černá (v závislosti na množství příměsi železa). Jeho krystalická mřížka je krychlová (kubická) a je zobrazena na obr. 22 V periodické tabulce prvků je na 30 místě, řadí se mezi kovyskupiny B, to jsou kovy, které mají plně obsazenou předposlední sféru elektrony. Vykazují již některé vlastnosti

nekovů, tvoří přechod mezi kovy a polokovy (z technicky důležitých kovů do této skupiny patří Mg, Al, Sn, Pb, Bi).



Obr.2-3 Hexagonální krystalická mřížka[30]

V tabulce 2.1.1 jsou uvedeny vybrané mechanické vlastnosti čistého zinku.

Tabulka 2.1 Hodnoty vybraných mechanických vlastností čistého zinku

| Vlastnost | Hodnota |
|--|------------------|
| Pevnost v tahu R_m [MPa] | 127 až 196 |
| Youngův modul pružnosti v tahu E [MPa] | 34500 až 120 000 |
| Tvrdość HB [MPa] | 300 |
| Poissonova konstanta m [1] | 0,2 až 0,3 |

Tabulka 2.2 Hodnoty vybraných fyzikálních a chemických veličin čistého zinku

| Veličina a symbol | Hodnota |
|--|---------------------------|
| Protonové číslo Z [1] | 30 |
| Relativní atomová hmotnost m_A A_r [1] | 65,38 |
| Krystalová mřížka | Hexagonální |
| Mřížková konstanta [nm] | $a = 0,266$; $c = 0,495$ |
| Hustota ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] | 7133 |
| Hustota při teplotě tavení [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] | 6590 |
| Teplota tání T_T [$^{\circ}\text{C}$]; | 420 |
| Teplota varu T_V [$^{\circ}\text{C}$] | 907 |
| Skupenské teplo vypařování [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$] | 1781900 |
| Skupenské teplo krystalizace L_{KR} [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$] | 100850 |
| Měrná tepelná kapacita (při $T = 298 \text{ K}$) [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] | 383 |
| Součinitel tepelné vodivosti λ (při $T = 291 \text{ K}$) [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] | 111 |
| Součinitel délkové roztažnosti α (při $T = 313 \text{ K}$) [K^{-1}] | $29,2 \cdot 10^{-6}$ |



Obr. 2.4 Čistý zinek [11]

2.1.2 Zinek a jeho slitiny[1] [15] [16] [17]

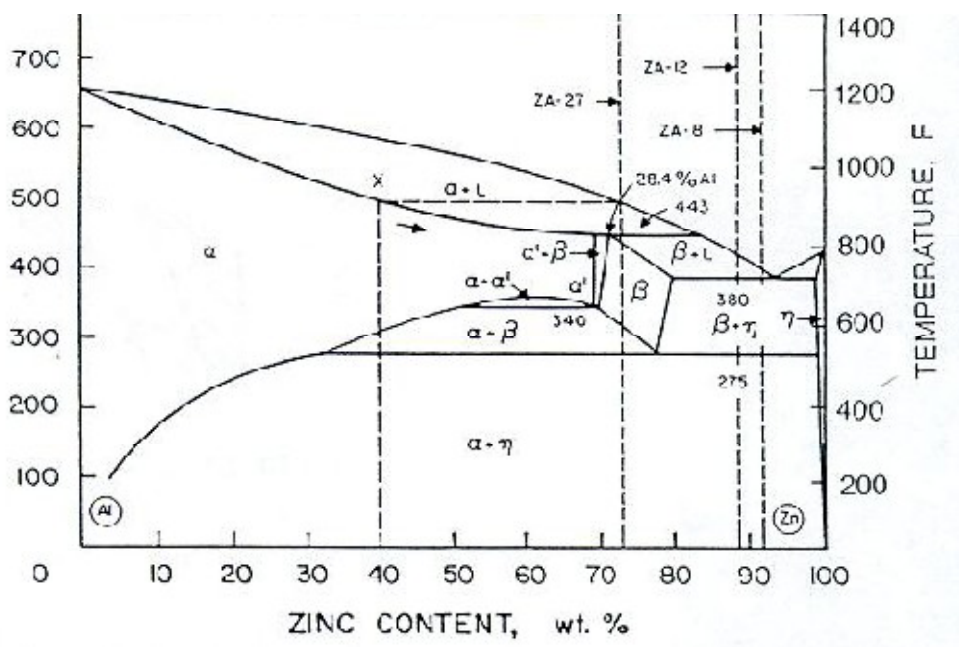
Čistý zinek se dobře odlévá, ale jeho mechanické vlastnosti jsou poměrně nižší. Pro výrobu odlitků se používají slitiny zinku. Ze slitin zinku mechanické vlastnosti. Proto se pro odlévání používají slitiny zinku. Na povrchu zinku a jeho slitin se na vzduchu vytváří vrstva uhličitany $4Zn(OH)_2 \cdot CO_2$ šedé barvy, která je ve vodě téměř nerozpustná a chrání ho před oxidací. Výrobky mohou být korozně napadeny ve styku s destilovanou vodou, vodní párou, kyselinami a zásadami. V elektricky vodivém styku s jinými kovy mohou být ve vlhké atmosféře napadeny elektrokorozí. Slitiny zinku jsou naopak velmi odolné proti dlouhodobému působení benzínu a olejů, což je spolu s jejich velmi dobrou slévateľností předurčilo k odlévání tvarově složitých odlitků, např. automobilových karburátorů.

Výrobky, resp. odlitky ze slitin zinku se nedoporučuje používat v horké páře, která vyvolává korozi, avšak horká voda naopak těmito odlitkům neškodí. K povrchové úpravě odlitků ze slitin zinku se často používá galvanické pokovování, kterým se nanáší vrstva mědi, niklu, chrómu, mosazi, stříbra, případně i zlata.

Obrábění slitin zinku, lze provádět běžnými nástroji použitím rychlořezných ocelí, keramiky nebo slinutých karbidů, tím lze dosáhnout lepší jakosti povrchu. Pájení odlitků ze slitin zinku běžnými Pb-Sn pájkami lze provádět především tehdy, jsou-li galvanicky poniklovány. K pájení galvanicky nepokoveného odlitku je vhodná pájka o složení (hmot. %) 82,5 % Cd a 17,5 % Zn. Odlitky ze slitiny zinku lze svařovat plamenem s redukční atmosférou. Jako přídatný materiál se používá tyčinka odlitá ze slitiny obdobného složení, jako má samotný odlitek.

Slitiny zinku, které se používají v našich slévárnách, byly podrobně popsány PTÁČKEM a USTOHALEM [1]. V současné době se objevují ve světě další slitiny zinku. Tento příspěvek se na charakteristiku těchto slitin zaměřuje.

Základem všech prakticky používaných slitin zinku je soustava Zn-Al. Rovnovážný diagram Zn-Al, resp. Al-Zn, viz obr. 2-5, je typem rovnovážného diagramu s primární fází s omezenou rozpustností přísadového prvku a se vznikem eutektika. Eutektikum je tvořeno fází Zn a ZnAl. Eutektická teplota je 382°C při obsahu 95 % Zn. Oba kovy jsou v kapalném stavu dokonale rozpustné. V tuhém stavu je jejich rozpustnost omezená, avšak v hliníku se rozpouští značné množství zinku (cca 35 % při eutektické teplotě 382°C). Rozpustnost hliníku v zinku je velmi malá (1% při eutektické teplotě), za normální teploty je pouze 0,05 %. Při eutektické teplotě se tavenina rozpadá na eutektikum $\alpha_1 + \beta$. Při eutektoidní teplotě, která je 275°C dochází k eutektoidní přeměně $\alpha_1 \rightarrow \alpha + \beta$. Rozmezí této eutektoidní přeměny je od 31,6 do 78 % Zn hmot. % Zn.



Obr. 2-5 Rovnovážný binární diagram Al – Zn [1]

Označení slitin zinku je různé, podle výrobce a země původu. Slitiny zinku lze rozdělit podle množství hliníku:

- slitiny zinku s nižším obsahem hliníku;
- slitiny zinku s vyšším obsahem hliníku;
- slitiny speciální.

Slitiny zinku s nižším obsahem hliníku, byly dříve v našich slévárnách používány pod označením ČSN (Tomu odpovídaly tři používané slitiny ZnAl4, ZnAl4Cu1, ZnAl4Cu3, kde v označení je uveden obsah použitých přísadových prvků (hliníku a mědi). Ve světě jsou k

těmto slitinám ekvivalentní slitiny, které jsou známé pod obchodním označením Zamak.(podle německého názvu základních prvků - Zink, Aluminium, MAgnesium, Kupfer). Slitiny Zamak odpovídají dalšímu, ve světě používanému označení ekvivalentních slitin zinku:

Zamak 3 - ZnAl4 - Zn400 - ZL3 - ZL0400, ČSN 423558;

Zamak 5 - ZnAl4Cu1 - Zn410 - ZL5 - ZL0410, ČSN 423660;

Zamak 2 - ZnAl4Cu3 - Zn430 - ZL52 - ZL0430, ČSN 423562.

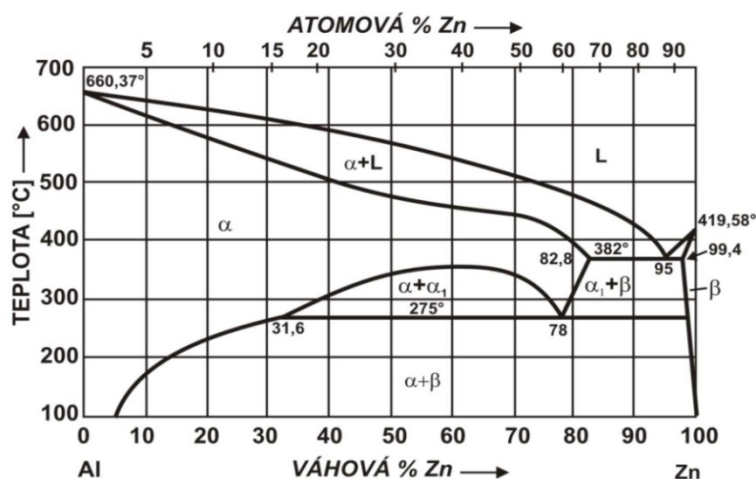
Tyto slitiny odpovídají normě EN 1774 a mají vynikající slévárenské fyzikální a mechanické vlastnosti a dlouhodobou rozměrovou stálost. Z těchto slitin je nejpoužívanější slitina ZnAl4 (obsahuje 4 % hliníku, 0,06 až 0,035 % Mg). Slitiny zinku, které tvoří soustavu Zn-Al-Cu, odpovídají ternárnímu diagramu, viz obr. 2. Slévárenské vlastnosti těchto tří slitin, jsou podobné, jediný rozdíl mezi nimi je v obsahu mědi. Měď, podobně jako hliník, zmenšuje velikost zrna, zvyšuje mechanické vlastnosti slitin, především pevnosti v tahu, tažnosti a rázovou houževnatost a zlepšuje zabíhavost slitin. Při obsahu mědi nad 0,7 % se zlepšuje odolnost proti korozi. Ve slitinách bývá obsah mědi v rozmezí od 0,5 do 3 %. Hořčík ve velmi malém množství zvyšuje pevnost v tahu a kompenzuje škodlivý vliv příp. obsahu cínu, olova a kadmia. Obsah hořčíku bývá 0,01 až 0,03 %. Nečistotami ve slitinách zinku jsou zvláště železo, olovo, kadmium a cín. Podporují vznik mezi krystalické koroze a jejich obsah nesmí překročit řádově tisícinu procenta. Z tohoto důvodu se při výrobě slitin musí vycházet z velmi čistého zinku (99,995%).

Tyto slitiny jsou, také využívány na pokovování, konečné úpravy a strojové obrábění. Odlitky lité pod tlakem mají dobré univerzální mechanické vlastnosti a mohou být odlévány ve velmi tenkých částech a s velmi přesnou rozměrovou tolerancí. Zinkové slitiny jsou často používány pro pokovování nebo velmi dekorativní aplikace pro jejich vynikající povrchové charakteristiky. Hlavní oblasti použití hotových výrobků ze slitin zinku litých pod tlakem jsou automobilový průmysl, stavitelský sektor, elektrické příslušenství a elektronika. Zinkové slitiny ze skupiny ZnAl4 jsou odlévány tlakovým litím do teplé komory, která je odlišná od lití pod tlakem do studené komory obvykle používané pro hliník. Typické tolerance zinkových odlitků litých pod tlakem jsou 1/1000 z hlavního rozměru (nebo $\pm 0,0015$ mm/mm pro první mm s přídavkem $\pm 0,002$ mm/mm na delší části).

Mezi základními slitinami zinku jsou binární slitiny Zn-Al a Zn-Cu a ternární slitiny Zn-Al-Cu. Největší využití mají slitiny soustavy Zn-Al. Hlavním přísadovým prvkem je hliník a jeho obsah se v těchto slitinách pohybuje v rozsahu 4 až 27 %, dalšími obvyklými přísadovými prvky jsou měď a hořčík. Předností slitin na bázi zinku je výborná slévatelnost a dobré mechanické vlastnosti. Hlavním nedostatkem binárních a ternárních slitin zinku je jejich sklon ke stárnutí, což je proces mající za následek objemovou kontrakci odlitků.

Soustava Zn – Al

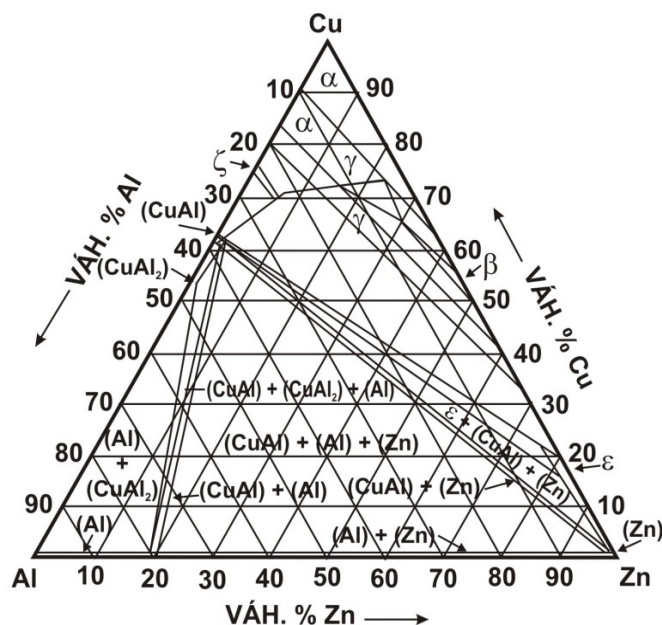
Oba kovy jsou v kapalném stavu dokonale rozpustné. V tuhém stavu je rozpustnost hliníku v zinku omezená, ale v hliníku se zinek rozpouští ve značném množství. Za eutektické teploty je ve fázi β 1 % Al, za normální teploty jen asi 0,05% Al. Rovnovážný diagram Zn-Al, viz obr. 2-5, je typem rovnovážného diagramu s primární fází s omezenou rozpustností přísadového prvku a se vznikem eutektika, tvořeného fázemi Zn a ZnAl. Při eutektické teplotě 382°C se tavenina rozpadá na eutektikum tvořené fázemi $\alpha_1 + \beta$. Fáze α_1 je však stabilní jen do teploty 275 °C a při této eutektoidní teplotě dochází k jejímu rozkladu (eutektoidní přeměně): $\alpha_1 \rightarrow \alpha + \beta$. Rozmezí této eutektoidní přeměny je od 31,6 do 78 % Zn. V tomto koncentračním rozmezí jsou nad eutektoidálou dvě fáze $\alpha_1 + \alpha$, obě kubické, plošně centrované s přibližně stejnými mřížkovými parametry.



Obr. 2-6 Rovnovážný binární diagram Zn – Al[1]

Soustava Zn-Al-Cu

Mezi základními slitinami zinku je i ternární soustava Zn-Al-Cu, jehož diagram je uveden na obr. 2-7.



Obr. 2-7 Rovnovážný diagram Zn-Al-Cu[1]

Z diagramu na obr. 2-6 je zřejmé, že při teplotě ternárního eutektika 375 °C jsou v rovnováze čtyři fáze viz. tab. 2-1

Tab. 2-1 Fáze ternární soustavy Zn-Al-Cu

| Kapalná | 7 % Al | 3,9 % Cu |
|--------------------------|----------|-----------|
| Tuhý roztok bohatý na Zn | 1,3 % Al | 2,9 % Cu |
| Tuhý roztok bohatý na Al | - | 1,8 % Cu |
| Fáze ε Cu - Zn | 1,4 % Al | 15,2 % Cu |

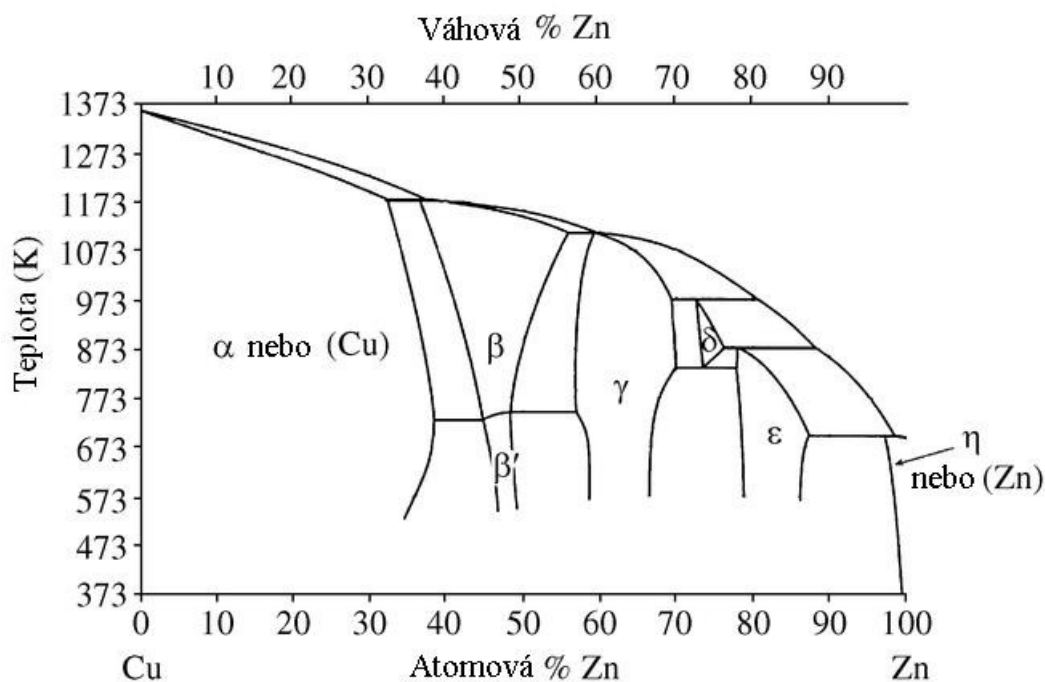
Při nižších teplotách se fáze bohatá hliníkem rozpadá. Vliv mědi na tento rozpad není znám. Rozpustnost mědi a hliníku v tuhém zinku od eutektické teploty klesá na 0,9% Al a 1,9 % Cu při 274°C.

Ternární slitiny mají, podobně jako slitiny Al-Zn, sklon ke stárnutí. Jeho podstatou je probíhající precipitace a segregace fází vedoucí k objemovým změnám.

Ačkoliv se jedná o důležitý diagram, není zcela prostudován do podrobností.

Soustava Zn –Cu

Další používaná binární slitina je soustava Zn-Cu. Na rozdíl od hliníku, zvyšuje přísada mědi teplotu tání zinku. Po peritektické přeměně při teplotě 424 °C stoupá křivka likvidu prudce vzhůru. Ve struktuře technických slitin Zn - Cu, které obsahují maximálně asi 4% Cu, jsou vedle sebe tuhé roztoky $\eta + \epsilon$. Rozpustnost mědi v krystalech se s klesající teplotou zmenšuje a probíhající segregace souvisí s objemovými změnami, podobně jako u slitin Zn – Al. Žiháním při teplotě asi 80 až 100 °C s následujícím volným ochlazením je možno objemové změny zmenšit na minimum. Rovnovážný diagram soustavy Zn – Cu je zobrazen na obr. 2-7.



Obr.2-8Rovnovážný diagram Zn - Cu (teplota v °C = $T[K] - 273,15$) [1]

Průmyslové slitiny zinku [15]

Využití a spotřeba stávajících zinkových slitin v poslední době intenzivně roste, jejich aplikace se rychle rozšiřuje a vyvíjejí se nové speciální slitiny zinku. Je to především díky poměru nízkých výrobních nákladů a jejich vynikajícím mechanickým vlastnostem. Tyto slitiny jsou schopny konkurovat a nahrazovat většinu slitin hliníku, mědi a litinys lupínkovým

grafitem. Na obr. 2-8 je zobrazena ilustrace a uvedeno porovnání mezí pevnosti v tahu, vrubové houževnatosti a tvrdosti u vybraných slévárenských materiálů.



Obr. 2-9 Porovnání mechanických vlastností slitiny zinku (Zn 430) s jinými materiály

Slitiny využívané pro průmyslové účely mají obchodní označení Zamak. [17]

Slitiny Zn-Al typu Zamak

Zamak slitiny – zinku s obsahem 4% (resp. 3.7% až 4,3%), slitiny se liší v rozdílném množství přísadových prvků, především mědi (0% až 3,2% Cu) a hořčíku (0.02 % až 0.06 Mg). Tyto přísadové prvky ovlivňují různé mechanické a fyzikální vlastnosti. Slitiny obsahují (99.995%) čistého zinku. Jsou to nejpoužívanější zinkové slitiny.

Tab.2-2 Přehled slitin Zn – Al typu Zamak

| ČSN | EN | Složení | Název | Jiné názvy |
|---------|---------------|----------|------------------|------------|
| 42 3558 | ZP0400 | ZnAl4 | ZAMAK 3 (Zn 400) | ZL3/ZL0400 |
| 42 3560 | ZP0410 | ZnAl4Cu1 | ZAMAK 5 (Zn 410) | ZL5/ZL0410 |
| 42 3562 | ZP0430 | ZnAl4Cu3 | ZAMAK 2 (Zn 430) | ZL2/ZL0430 |

Všechny tyto základní slitiny byly vyvinuty mezi roky 1920 a 1930 a od té doby, jejich finální chemické složení zůstalo nezměněno. Skutečný průlom ve výrobě těchto slitin se projevuje po druhé světové válce a to díky vyšším požadavkům v automobilovém průmyslu.

Značka Zamak je pro celosvětový slévárenský průmysl znám jako zinková slitina ve vynikajícími slévárenskými vlastnostmi využívána především pro aplikace tlakového lití do teplé formy. S vynálezem tohoto způsobu odlévání zinkové slitiny je tento technologický postup znám produkcí odlitků pro vysoké série s přesnými tolerancemi, vynikajícími mechanickými vlastnostmi a vynikající povrchovou úpravou, schopný vyrobit odlitky složitých tvarů a velmi tenkých stěn.

Zájem o používání této slitiny zinku spočívá také v porovnání výrobních fyzikálních a mechanických vlastností a nízkých tavicích – výrobních nákladů, což splňuje potřeby pro střední a velké série odlitků u tlakového lití. Mezi hlavní výhody se řadí velká tvrdost a pevnost, vysoká rozměrová přesnost a stabilita, dlouhodobá rozměrová stálost, vynikající tenkostěnná způsobilost, vynikající elektrická měření vodivosti, vysoká teplotní vodivost, schopnost tváření za studena, výjimečná odolnost proti korozi (vyžití na pokovování a konečné úpravy), konečné charakteristické rysy vysoké kvality, cenově levná surovina, plná recyklovatelnost. V tabulce 2-3 jsou uvedeny fyzikální a mechanické vlastnosti Zn – Al.

Tab. 2-3 Přehled fyzikálních a mechanických vlastností Zn – Al [17]

| Vlastnost | Hodnoty vybraných vlastností odlitků ze slitin zinku odlévaných různými způsoby | | | | | | | | |
|-----------------------------------|---|---------|--------------------------|----------|----------|--------------------------|----------|----------|---------------------------|
| | Zn-Al 8 | Zn-Al 8 | Zn-Al 8 | Zn-Al 12 | Zn-Al 12 | Zn-Al 12 | Zn-Al 27 | Zn-Al 27 | Zn-Al 27 |
| | Písek | Kokila | Tlak.lití *) tepl.kom | Písek | Kokila | Tlak.lití *) stud.kom | Písek | Kokila | Tlak.lití **) stud.kom |
| R_m (MPa) | 248-275 | 220-255 | 360-385 | 275-310 | 310-345 | 390-415 | 400-440 | 310-325 | 405-440 |
| R_{p0,2} [MPa] | 193-200 | 190-200 | 280-300 | 206-213 | 213-200 | 310-330 | 338-345 | 310-325 | 360-380 |
| A₅ (%) | 1-2 | 1-2 | 5-10 | 1-3 | 2-5 | 4-7 | 3-6 | 8-11 | 1-2 |
| Hb | 85-90 | 85-90 | 95-105 | 105-125 | 105-125 | 95-105 | 110-120 | 90-100 | 110-120 |
| E (Mpa) | 85000 | | | 82500 | | | 75000 | | |
| Nárazová práce (Nm) | 17-24 | | | 23-30 | | | 34-54 | 47-74 | |
| Hustota (kg/m³) | 6,3 | | | 6,0 | | | 5,0 | | |
| Tavící teplota [°C] | 375-404 | | | 375-432 | | | 375-487 | | |

Poznámka: *) tlakové lití s teplou komorou, **) tlakové lití se studenou komorou písek – tepelné zpracování pro snížení vnitřního pnutí odlitku 3 hodiny při 320°C pomalé ochlazování v peci

Z této tabulky nám vyplývá, že slitiny zinku mají výborné mechanické vlastnosti za normálních teplot. Mají mnoho lepší vlastnosti než většina slitin hliníku, mědi a litiny s lupínkovým grafitem. Dynamické vlastnosti jsou také velmi dobré. Díky velmi značné tvrdosti jsou odlitky odolné vůči opotřebení. Značnou nevýhodou slitin zinku je především to,

že je zde prudký pokles mechanických vlastností při vyšších teplotách. Maximální provozní teplota by neměla přesáhnout 120 °C. Také při nízkých teplotách přibližně pod -20 °C dochází ke zhoršení mechanických vlastností především rázového houževnatosti. Na obrázku obr. 2-9 jsou zobrazeny housenky slitiny Zamak Zn430.



Obr. 2-10 Housky Slitiny Zamak 430 [18]

Zamak 3 (Zn 400)

Zamak 3 je nejběžnější slitina pro tlakové lití do teplé komory. Jeho vynikající rovnováha zásovkých fyzických a mechanických vlastností, výborná slévateľnosť a dlhodobá rozměrová stálost jsou důvodem, proč je přibližně 70% všech ZnAl odlitků vyrobeno s této slitiny. Vyznačuje se kromě odolnosti proti korozi i vynikající odolností a leštivostí. Zamak 3 je veden jako “standard” dle kterého jsou hodnoceny další zinkové slitiny v rámci tlakového lití.

Tab. 2-4 Chemické složení [hmot. %] slitin zinku pro tlakové lití dle ČSN [10]

| Označení | Al | Cu | Mg | Fe max. | Pb + Cd max. | Sn max. |
|-----------------|-----------|-------------|-------------|------------|-----------------|------------|
| ZnAl4 | 3,9 - 4,3 | 0,1 | 0,02 - 0,05 | 0,075 | 0,009 | 0,001 |
| ZnAl4Cu1 | 3,9 - 4,3 | 0,75 - 0,25 | 0,02 - 0,05 | 0,075 | 0,009 | 0,001 |
| ZnAl4Cu3 | 3,5 - 4,3 | 2,4 - 3,2 | 0,03 - 0,06 | 0,075 | 0,009 | 0,001 |

Zamak 5 (Zn 410)

Zamak 5 je srovnatelný se slitinou Zamak 3, ale je obecně používán tam, kde je požadovaná vyšší pevnost a tvrdost a kde rovnoměrná stálost není tak důležité kritérium. Zamak 5 obsahuje přídavek 1% mědi (Cu) která způsobuje okrajově vyšší pevnost v tahu, zvětšenou tvrdost a lepší korozní odolnosti. Slitina má menší rozměrovou stabilitu a tažnost.

Zamak 2 (Zn 430)

Zamak 2 vykazuje nejvyšší pevnost a tvrdost. Relativně vysoký obsah mědi (3%) způsobuje, že jeho pevnost je asi o 20% větší než u Zamak 3 a téměř o 10% větší než u zamak 5. Vysoký obsah mědi zároveň také podporuje dlouhodobé stárnutí, což má za následek, že stálost rozměrových a mechanických vlastností není tak dobrá jako u slitin Zamak 3 a 5. Tato změny zahrnují hlavně lineární kontrakci a snížení vrubové houževnatosti. I přesto si udržuje vyšší úroveň pevnosti a tvrdosti a stabilitu charakteristických vlastností slitiny. Obsah 3% Cu slitinu prodražuje a proto je použití této slitiny omezeno na aplikace vyšších nároků (vyšší pevnost v tahu vyšší tvrdost a větší odolnost proti korozi). Zamak 2 je jako jediná kromě tlakového lití užívaná i pro odstředivé lití. V tabulce 2-4 Je přehled vlastností vybraných slitin zinku.

Slitiny zinku s vyšším obsahem hliníku, tyto slitiny nebyly u nás používány, jsou vedeny pod označením ZA a jim též odpovídají další ekvivalentní slitiny:

ZA 8 - ZnAl8Cu1- ZL8 - ZL0810;

ZA 12 - ZnAl12Cu1- ZL12- ZL011110;

ZA 27- ZnAl27Cu2 - ZL27 - ZL02720.

Tab. 2-5 Hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností slitin zinku dle ČSN [10]

| Vlastnost | ČSN 42 3558 ZnAl4 | ČSN 42 3560 ZnAl4Cu 1 | ČSN 42 3562 ZnAl4Cu3 |
|---|-------------------------|--------------------------------|--|
| Hustota [kg.m ⁻³] při teplotě 20 °C | 6600 | 6700 | 6800 |
| Interval teplot tuhnutí [°C] | 386 - 380 | 386 - 380 | 390 - 379 |
| Maximální teplota přehřátí při odlévání [°C] | 440 | 450 | 440 |
| Smrštění při tuhnutí od teploty 470 do 20 °C [%] | 1,17 | 1,17 | 1,17 |
| Střední izobar. součinitel délkové roztažnosti (20 - 100 °C) [K ⁻¹] | 27,4 . 10 ⁻⁶ | 27,4 . 10 ⁻⁶ | 27,4 . 10 ⁻⁶ |
| Střední hodnota měrné tepelné kapacity (20 až 100 °C) [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹] | 400 | 400 | 400 |
| Měrná elektrická vodivost při 20 °C [S.m ⁻¹] | 15 - 16 | 15 | 14,5 - 15 |
| Teplotní koeficient el. odporu (0 - 100 °C) | 0,038 | 0,0035 | 0,0033 |
| Nejnižší mez kluzu 0,2 v tahu [MPa] | 200 - 230 | 220 - 250 | 170 - 200 ¹⁾ 200 - 230 ²⁾ |
| Nejnižší pevnost v tahu [MPa] | 245 | 275 | 215 ¹⁾ 235 ²⁾ |
| Nejnižší tažnost A ₅ [%] | 3 - 6 | 2 - 5 | 0,5 - 2 ¹⁾ 1 - 3 ²⁾ |
| Tvrdost podle Brinella (minimální) | 70 | 85 | 100 |
| Modul pružnosti v tahu [MPa] | 127 500 | 127 500 | 127 500 |
| Pevnost v tlaku [MPa] | 412 | 598 | - |
| Pevnost v střihu [MPa] | 216 | 275 | - |
| Mez únavy při 10 ⁸ cyklů [MPa] | 49 | 54 | - |
| ¹⁾ pro odlitky lité do pískových forem ²⁾ pro odlitky lité do kovové formy gravitačně | | | |

Tyto slitiny s vyšším obsahem hliníku se radikálně liší od standardních zinkových slitin ve složení, vlastnostech a slévateľnosti. ZA slitiny byly představeny pro gravitační lití, jak do pískových, tak do kovových forem. Pak byly také použity pro lití pod tlakem. Slitinu ZA8 je možno odlévat na strojích s teplou komorou. Slitiny ZA12 a ZA27 mohou být odlévány tlakovým litím na strojích pouze se studenou komorou a to proto, že hliník má vysokou reaktivitu se železem. Odlitky ze slitiny ZA, vykazují vysokou pevnost (do 400 MPa) a tvrdost (120 HBN), dobrou opracovatelnost a odolnost proti opotřebení, často lepší než standardní slitiny bronz. Odlitky ze slitin ZA, jsou konkurencí pro litinu, bronz a hliník,

protože mají všestranné vlastnosti a zpracovatelské výhody. Z těchto tří slitin je ZA12 preferovaná pro více aplikací a zvláště pro gravitační lití. Slitina ZA 27 nabízí vysoké mechanické vlastnosti bez ohledu na metodu lití. Obě tyto slitiny jsou vynikající (bearing materials). Slitiny ZA 8 a ZA12 vykazují dobré pokovovací vlastnosti. Dobrá slévateľnost slitiny ZA 8 při tlakovém lití do teplé komory a vysoké mechanické vlastnosti ZA 8 je také používána pro vysoce účinné aplikace, kde klasické slitiny zinku nemohou být použity. Všechny ZA slitiny nabízejí vysokou odolnost proti deformaci a výkonnost ve zvýšených teplotách ve srovnání se slitinami zinku typu Zamak.

Speciální slitiny zinku - do této skupiny slitin zinku patří speciálně vyvinuté slitiny zinku, které byly vytvořeny zejména pro jednotlivé druhy lití, jsou to slitiny:

Superloy, ZL0610, ZL0210, ZL0360, BERIC, Main Metal, Alzen P, Alzen S, ACuZinc 5, ACuZinc 10, Kirksite, KAYEM, KS;

ILZRO 14, ILZRO 16 – slitiny na bázi Zn - Al - Cu - Ti;

Slitina Superloy byla vytvořena pro tlakové lití na strojích s teplou komorou a obsahuje 7 % Al a 3,8 % Cu. Tato slitina má vynikající slévářenské vlastnosti (vysokou tekutost, dobrou zabíravost) a mechanické vlastnosti, je vhodná pro výrobu tenkostěnných odlitků.

Slitina ZL0610 je slitina obsahující 6 % Al a 1 % Cu a malé množství dalších přísad. Tato slitina je používána především pro sklopné lití. Obsahuje 2 % Al a 1 % Cu. Tato slitina je používána pro výrobu dekorativních předmětů, hraček a ostatních odlitků, které nevyžadují vynikající mechanické vlastnosti.

Slitina BERIC je slitina vyvinuta japonskou společností Nisso Smelting, Copany, je odvozena od slitiny ZnAl4Cu1, avšak tato slitina má vyšší obsah mědi (3 - 4 %) a dále malé množství titanu (0,01 %) a berylia (0,04 %). Berylium je pro některé své škodlivé vlastnosti zakázáno v zemích EU, proto tato slitina není v Evropě známa a používána.

Slitina Acuzinc 5 je určena pro tlakové lití na strojích s teplou komorou. Vyrobené odlitky se vyznačují vynikajícími vlastnostmi, jako je pevnost, tvrdost a snáší i deformační účinky. V důsledku odměšování některých složek slitiny během jejího tavení je nutné taveninu promíchávat. Teplota lití je u této slitiny okolo 500°C.

Slitina Acuzinc 10 je určena pro lití pod tlakem na strojích se studenou komorou, vykazuje podobné vlastnosti jako slitina Acuzinc 5.

Slitina Kirksite je vlastně jeden z obchodních názvů pro Zamak 2. Je to mírně pevnostní slitina Zn-Al, která je často využívána na výrobu tvářecích nástrojů a forem (zvláště pro vstřikování plastů). Odlitky z této slitiny umožňují snížení nákladů na obrábění, protože

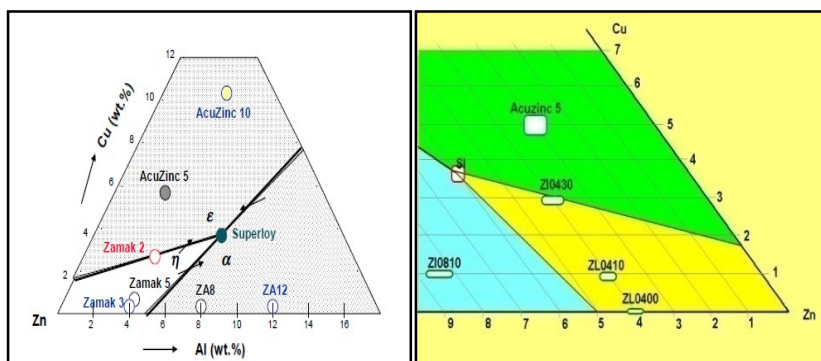
slitina umožňuje přesné lití a vyžaduje minimální dokončovací práce. Tato slitina může být také využívána jako univerzální slitina pro nenamáhané součásti. Její vysoká tepelná vodivost umožňuje rychlé ochlazení cyklů. Možnost využití této slitiny je především v oblasti gumárenském a keramickém průmyslu, dále pak na lisovací nástroje, vysekávací nože a razidla pro lisování plechů.

Slitina KAYEM slitina, která může být použita pro gravitační lití i lití pod tlakem do horké komory. Hlavní využití je zejména v gravitačním lití lisovacích a formovacích nástrojů. Vykazuje rozměrovou stálost a dlouhodobě konstantní mechanické vlastnosti a tím se řadí ke slitinám Zamak 3 a ZA8.

Slitina KS je v podstatě slitina Zamak 2, avšak má vyšší obsah hořčíku. Její využití je pro výrobu dekorálních součástí.

Slitiny ILZRO12, 14 a 16 jsou slitiny na bázi Zn - Al - Cu - Ti, jsou slitiny používané pro gravitační lití do kovových, pískových, sádrových a skořepinových forem.

Na obr. 2-11 je část ternárního diagramu Zn-Al-Cu s vyznačením chemického složení slitin zinku.



Obr. 2-11 Ternární soustava Zn – Al – Cu s vyznačením chemického složení vybraných slitin zinku [13]

Slévárenské slitiny zinku lze rozdělit podle použité technologie do tří skupin: slitiny pro tlakové lití, slitiny pro gravitační lití a slitiny pro méně obvyklé metody. Tomuto dělení také do jisté míry odpovídá také rozdělení výše uvedených slitin. Převážná většina odlitků ze slitin zinku se vyrábí tlakovým litím. Způsob odlévání slitin zinku do pískových a keramických forem, byl rozvinut již v první polovině minulého století. Mezi neobvyklé a méně používané způsoby se řadí odlévání slitin zinku do sádrových forem, sklopné lití nebo lití do forem ze silikonové pryže.

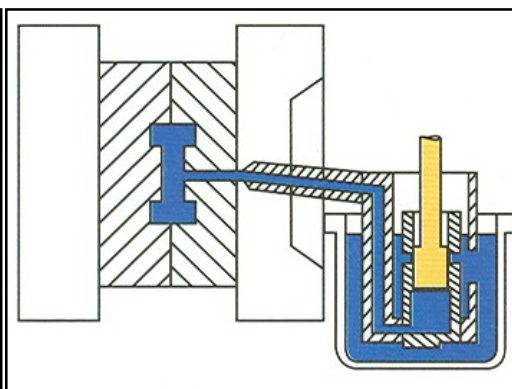
2.1.3 Výroba odlitků ze slitin zinku

Výrobu odlitků ze slitin zinku lze provádět různými způsoby, avšak nejvíce je využívána metoda vysokotlakého lití na strojích s teplou komorou. Dále se používá také vysokotlaké lití na strojích se studenou komorou, gravitační, odstředivé a sklopné lití.

Technologie vysokotlakého lití slitin zinku se uplatňuje při výrobě tvarově složitých odlitků s hladkým povrchem a velmi přesnými rozměry. Odlitky ze slitin zinku do hmotnosti cca 900g, jsou nejčastěji odlévány na strojích s teplou vertikální tlakovou komorou (např. tlakové stroje s teplou komorou fy. FRECH), viz obr. 2-12, s uzavírací silou 20 000 až 63 000 [N]. Tavenina slitiny zinku o teplotě 410 až 420 °C je vstřikována do dutiny kovové formy o rychlosti až 100 m.s^{-1} , s dotlakem cca 10 až 30 MPa, [2].



Obr.2-12 Stroj pro tlakové lití [15]



Obr. 2-13 Schéma tlakového lití[15]

Stroje pro tlakové lití se studenou komorou jsou využívány pro slitiny zinku s vyšším obsahem hliníku (např. slitina ZA27), tato slitina má vyšší bod tání. Roztavený kov je odléván do studené komory ručně nebo automaticky pánví. Hydraulicky ovládaný píst uzavírá komoru a vysokým tlakem je kov vtlačen do dutiny formy.

Nejznámější firmy vysokotlakého lití slitin zinku se v České republice jsou: Motor Jikov Group, a.s. tlaková slévárna; Beneš&Lát Průhonice (pobočka Slaná u Semí);POWER CAST ORTMANN s.r.o. Děčín; TENZA, a.s. závod slévárna Adamov; Karel Dítě – zinková slévárna; Alupressing – slévárna s.r.o. Blansko; Alfe Brno; Tlakové lití kovů, s.r.o Lanškroun; TOKOZ, tlakové lití zinku Žďár n. Sázavou;GRÄTHER-tlakové lití, s.r.o. Vodňany, KOVAP v.d. Náchod. V zahraničí je nejrozšířenější firma Dynacast, která má výrobní kapacitu v USA, Kanadě, Německu, Francii, Rakousku a v dalších zemích.

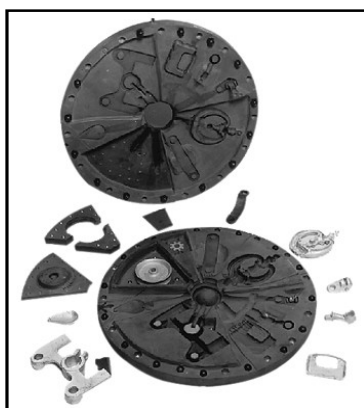
Gravitační lití je nejstarší způsob výroby odlitků. Při této výrobě se odlévá do různých typů slévárenských forem. Nejčastěji se jedná o gravitační lití do kovových forem a do pískových forem. Tato technologie se používá v zahraničí. Formy jsou vyrobené z litiny s lupínkovým grafitem nebo z nástrojové oceli. Značnou výhodou kovových forem je velmi kvalitní povrch pracovního líce. Tyto formy bývají předehřáté na teplotu 180 až 200 °C. Nejčastěji jsou odlévány odlitky o hmotnosti od 50 g do 20 kg. Typickým výrobním sortimentem bývají drobné součásti pro automobilový průmysl, viz obr. [18]. Na obr. 2-14 je znázorněn postup gravitačního lití.



Obr. 2-14 Gravitační lití slitiny zinku do trvalé formy[21]

Lití do pískových forem je nejjednodušší výroba odlitků z neželezných kovů. Tento proces je vhodný pro výrobu malého počtu odlitků složitých tvarů, které při výrobě vyžadují složitá jádra. Výhody tohoto procesu jsou, relativně nízké náklady. Nevýhodou tohoto procesu je malá produktivita práce, minimální tloušťka stěny odlitku, je 3 až 5 mm, malá lineární tolerance (např. 4mm na 1m), drsnost povrchu ($R_a = 6,5$ až $12,5 \mu\text{m}$) a větší hmotnost odlitků než je hmotnost odlitků litých pod tlakem. Slévárny, které odlévají slitiny zinku do pískových forem používají tradiční dřevěné modely, které se mohou přizpůsobit jednotlivým typům odlitků. Pro gravitační lití se používají slitiny zinku s vyšším obsahem hliníku např. ZA12 (ekvivalentními slitinami jsou ZL12; ZL1110). Dále slitina ZA 27 (ekvivalentními slitinami jsou ZL27; ZL2720). Proces umožňuje velkou přizpůsobivost velikosti a tvaru odlitků, použití jader pro vnitřní zářezy a vnitřní dutiny, které jsou obtížné nebo neuskutečnitelné např. trvalou formou.

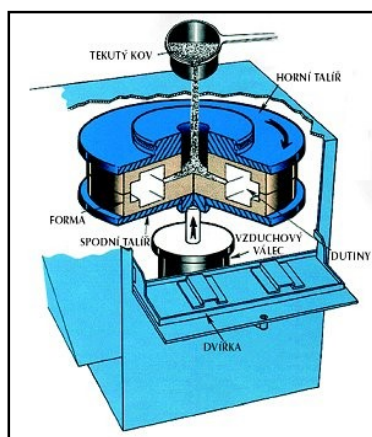
Odstředivé lití slitin zinku je technologie založená na využití forem ze silikonové pryže a odstředivé síly. Formy používané při tomto způsobu odlévání mají kruhový tvar, viz obr. 2-15. Roztavená slitina zinku se vlévá do vtokové soustavy rotující formy. Na obr. 2-16 je ukázka stroje TWINCASTERS pro odstředivé lití od firmy TEKCAST Industries, Inc. Obr. 2-16 zobrazuje průřez strojem pro odstředivé lití a popisuje jeho základní pracovní části, [15].



Obr. 2-15 Silikonová forma pro odstředivé lití slitin zinku [38]



Obr. 2-16 Stroj pro odstředivé lití od firmy Tekcast [15]



Obr. 2-16 Průřez strojem pro odstředivé lití [15]

Silikonové formy se vyrábí pomocí modelů, které jsou ručně zaformovány do měkké neztvrdlé formovací hmoty. Je možné vytvořit libovolně členitou dělicí rovinu. Forma s modely a separací určenou dělicí rovinou je uzavřena do vulkanizačního rámu a vložena do vulkanizačního lisu. V lisu, za teploty 180°C a za vysokého tlaku, proběhne vulkanizace formovací hmoty do pevného stavu s dutinou věrně kopírující povrch a tvar modelu. Do dutiny je ručně nařezán vtokový a odvětrávací systém. Forma je připravena k odlévání. Odstředivé lití je vynikající technologií na výrobu odlitků prototypových sérií ve všech odvětvích průmyslu. Odstředivým litím lze vyrábět vysoce kvalitní a přesné dekorativní předměty, povrchově upravené pokovením, barvením, lakováním i leštěním. Stejně tak lze vyrábět nábytková kování, panty, klíče a různé mechanické součásti vhodné pro jakékoli odvětví. Odstředivé lití nabízí vyšší kvalitu v oblasti pevnosti materiálů, přesnosti odlitků a lepší reprodukci detailů. Tento způsob lití nabízí možnost výroby součástí stejných jako při lití do kovových forem nebo vyráběných obráběním, ale při mnohem nižších finančních nákladech a velké úspoře času a práce.

Odlitky vyrobené odstředivým litím ze slitin zinku, viz obr. 2-18, jsou rozměrově přesné, povrchově velmi kvalitní, s minimálními požadavky na další opracování. Dosahovaná tolerance součástí se pohybuje v průměru mezi 0,05 až 0,1 mm. Maximální rozměr odlitku je vymezen rozměry formovacích rámců, které bývají 220 x 150 x 80 mm. Maximální hmotnost odlitku je odhadována 1,0 až 1,5 kg.

Výrobou odlitků odstředivým litím se v České republice zabývají firmy: Kovovýroba - Ostrava, Slévárna slitin zinku Ing. Bína a Vaněk, Pelhřimov, Kovoobrábění Vojtěch Janků - Zašová, TEOLI spol. s r.o. - Žďár nad Sázavou, ZIREL - Ostrava, ALFE Brno, s r.o.



Obr. 2-18 Typy odlitků ze slitin zinku litých metodou odstředivého lití (výroba fa. ALFE Brno a TEOLI spol. s r.o.[13])

Sklopné lití neboli "zvrtné výklopné lití", je další metodou odlévání slitin zinku. Při tomto procesu se používají formy vyrobené z bronzu. Bronzová forma umožňuje zinkové slitině

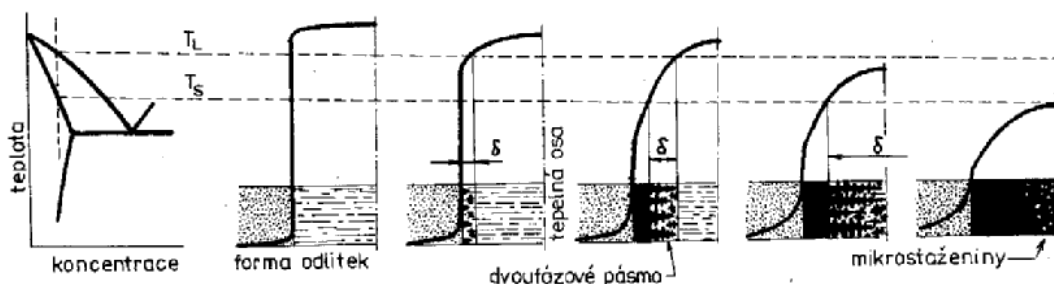
odlití do formy a vylití zpět před celkovým ztuhnutím odlitku. Po odlití do formy se tavenina rychle ochladí pouze na lici formy. To umožňuje vylití zbylé taveniny. Toto je výhodné pro výrobu dutých ozdobných předmětů jako svícny, lampy, sochy a podobně, [13].

2.2 Dilatační změny při tuhnutí odlitků

Během utváření, tuhnutí a chladnutí, odlitků probíhají tepelné a fyzikální děje, které ovlivňují konečný tvar i homogenitu odlitku. Je to především smršťování kovů při poklesu teploty, která jednak mění výsledné vnější rozměry odlitku, jednak vyvolává podmínky k vytváření vnitřních dutin. Zároveň s poklesem teploty se snižuje rozpustnost plynů v kovu a uvolňující se plyny mohou rovněž ovlivnit homogenitu odlitku.

2.2.1 Tuhnutí odlitků [8]

Tuhnutím odlitků se rozumí vytváření souvislé vrstvy tuhé fáze na úkor fáze tekuté. Postup tuhnutí je určován teplotním polem v soustavě odlitek - forma, které závisí na charakteristikách odlitku a fyzikálně-tepelných vlastnostech slitiny a formy. Tuhnutí odlitků probíhá v dvoufázovém pásmu, tj. oblastí mezi izolikvidou a izosolidou (izotermami spojujícími místa, s teplotou likvidy, resp. solidu). Takovéto tuhnutí je označováno jako tuhnutí neprogresivní (dvoufázové), viz. Obr. 2-19



Obr. 2-19 Postup tuhnutí odlitku[14]

U čistých kovů a eutektických slitin probíhá tuhnutí při určité teplotě ve velmi úzkém pásmu. Toto tuhnutí se označuje jako progresivní (vrstevnaté).

široké dvoufázové pásmo je nepříznivé pro jakost odlitků. Mezi rostoucími krystaly tu zůstávají uzavřeny ostrůvky taveniny, po jejichž ztuhnutí zbudou mikrostažení. Jejich výskyt je nejvyšší v okolí tepelné osy odlitku, tj. v místech, které tuhnou naposledy.

Šířka dvoufázového pásma (δ) je závislá především na:

- a) Lící teplotě
- b) Rozdíl mezi teplotou solidu a likvidu slitiny
- c) Teplotní vodivosti slitiny
- d) Tvaru a tloušťce stěny odlitku
- e) Rychlost přestupu tepla z odlitku do formy,

2.2.2 Objemové změny [19], [20]

Podstatou smršťování jsou objemové změny tekuté a tuhé fáze kovu s poklesem teploty a objemové změny při fázových přeměnách. Projevují se charakteristickými změnami v odlitku, při nichž se jeho celkové rozměry zmenšují, popř. se v něm vytvářejí staženiny a dochází k vnitřnímu pnutí. Posuzujeme-li konečný rozměr odlitku z hlediska komplexních vlivů, musíme k základním vlivům počítat nejen dilatace vázané na druh použité slitiny, ale i dilatace formy, do níž se odlévá, a vliv tvaru odlitku.

Objem kovu je při dané teplotě a tlaku konstantní. Při normálním tlaku je objem funkcí teploty. Měřidlem přírůstku objemu na stupeň zvýšení teploty je koeficient objemové roztažnosti.

$$\gamma = \frac{1}{V_0} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2.1)$$

Kde značí: γ - Součinitel objemové roztažnosti (smrštění) [K⁻¹],

V_0 - Počáteční objem [m³],

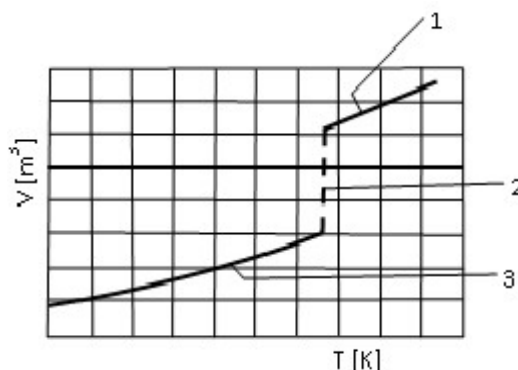
ΔV - Změna objemu [m³],

ΔT - Změna teploty [K],

S rostoucí teplotou se plynule mění objem kovu a zároveň dochází k poklesu jeho hustoty. Je to dáno tím, že se zvětšuje parametr krystalové mřížky, tím klesá její hustota a přestože je krystalická stavba kovu v podstatě stejná, mění se meziatomové vzdálenosti. Určité teplotě tedy odpovídá určitá meziatomová vzdálenost. Při zahřívání se zvětšuje, při chladnutí naopak zmenšuje. Pokud se tyto vzdálenosti nemohou v důsledku nějakého vnějšího zásahu měnit, vznikají v mřížce pnutí. Při změně skupenství se pak mění objem skokem sdalšímu plynulýmpřírůstkem v tekutém stavu (viz Obr 2-15). Fyzikální proces změny objemu při změně teploty je vratný, tudíž objem zvětšující se při ohřevu se při ochlazování vrací do původní velikosti. Úbytek objemu při snížení teploty se nazývá

smrštění. Křivka změny specifického objemu kovu v závislosti na teplotě zobrazena na Obr. 2-20.

- 1) Smrštění v tekutém stavu,
- 2) Smrštění při změně skupenství,
- 3) Smrštění v tuhém stavu.



Obr.2-20 Křivka změny specifického objemu kovu v závislosti na teplotě [5]

U slitin tuhnoucích při konstantní teplotě je průběh závislosti změny objemu na teplotě stejný, jako u čistých kovů. U slitin tuhnoucích v teplotním intervalu nastává velká změna mezi TL a TS .

Smrštění odlitku vyrobeného z určité slitiny není stejné jako smrštění této slitiny.

Smrštění slitiny je fyzikální vlastnost, kterou určuje fyzikální úbytek objemu při snížení teploty. Smrštění odlitku závisí na smrštění slitiny a závisí technologických podmínkách výroby odlitku, jako jsou teplota a čas lití, intenzita odvodu tepla a konstrukce odlitku.

Změny objemu odlitku charakterizuje technologický úbytek objemu. Objemové změny při tuhnutí a chladnutí odlitku se dělí dle teplotního intervalu na:

- a) objemové změny v tekutém stavu (interval teplot $T_{lití} - TL$)
- b) objemové změny v intervalu tuhnutí ($TL - TS$)
- c) objemové (lineární) změny v tuhém stavu ($T_{zls} - T_{op}$, teplota začátku lineárního smrštění - teplota okolního prostředí).

Objemové změny v tekutém stavu - ihned po odlití taveniny do formy začíná odvod tepla z kovu, tavenina chladne a dochází ke smršťování v tekutém stavu, které probíhá od teploty lití $T_{lití}$ až do teploty likvidu T_L . Objemové změny se v tomto teplotním intervalu se

projevují poklesem hladiny taveniny vlivem gravitační síly. Tuto fázi smrštění v tekutém stavu charakterizuje úbytek objemu $\Delta V'_L$.

Hodnota celkové změny objemu odlitku v kapalném stavu je:

$$\Delta V_L = \Delta V''_L + \Delta V'_L = \gamma_L \cdot (T_{liti} - T_L) \cdot V_0 \quad (2.2)$$

kde značí: V_0 - počáteční objem taveniny,

γ_L -průměrná hodnota součinitele objemového smrštění v teplotním intervalu,

$T_{liti}-T_L$ [K⁻¹].

Z tohoto vztahu, že hodnota ΔV_L je přímo úměrná teplotě přehřátí taveniny nad teplotu likvidu a tedy, že míru smrštění můžeme ovlivnit regulací teploty lití. Nejúčinnějším prostředkem proti smrštění je co nejnižší teplota lití. Tu lze nejsnadněji dosáhnout při lití pod tlakem.

Objemové změny v intervalu tuhnutí – v intervalu tuhnutí probíhá změna tekuté fáze ve fázi tuhou. Podle teoretických úvah o vnitřní stavbě taveniny lze očekávat, že po ztuhnutí bude mít krystalická fáze při teplotě menší objem, neboť ubude volný prostor mezi krystalovými elementy, které jsou pro roztavený kov charakteristické. Takto se smrštění v intervalu tuhnutí projevuje u čistých kovů. U komplexních slévárenských slitin může být průběh smršťování ovlivněn vylučováním několika tuhých fází. Objemové změny mezi teplotami likvidu a solidu $\Delta V_{L,S}$, se projevuje vznikem soustředné staženiny, vnitrodendritické a mezidendritické pórovitosti. Rozdělení objemových změn mezi uvedené dutiny závisí na morfologii tuhnutí slitiny a na intenzitě chladnutí odlitku.

Smršťování odlitku při tuhnutí začíná vznikat prvních tuhých částic z taveniny na stěně formy a končí ztuhnutím poslední části taveniny v tepelné ose odlitku. Při tuhnutí se vyskytují všechny druhy objemových změn současně.

Při tuhnutí čistých kovů a slitin, s nulovým rozsahem teplot tuhnutí, tedy při tuhnutí s plynulým postupem souvislé krystalické fronty, vzniká soustředná staženina o objemu V_{st} . Staženina se začíná vytvářet, když na celé ploše lící formy ztuhne souvislá vrstva kovu, uzavírající uvnitř taveniny. Od tohoto okamžiku plynule probíhá:

- a) Zmenšení objemu taveniny uzavřené mezi stěnami odlitku o hodnotu $\Delta V''_L$, což se projeví snížením její hladiny ve formě.

- b) Zmenšení objemu taveniny uzavřené mezi stěnami odlitku o hodnotu $\Delta V''_L$, protože dochází k fázové přeměně.

$$\Delta V_{L-S} = \gamma_s \cdot (T_L - T_S) \cdot V_0 \quad (2.3)$$

Kde značí: V_0 – počáteční objem odlitku [m^3],
 γ_s – průměrnou hodnotou součinitele objemového smrštění v intervalu
 teplot $T_L - T_S [K]$.

- c) Zmenšení plochy klesající hladiny v důsledku postupu tuhé fáze k teplené ose odlitku.
- d) Smrštění ztuhlých částí při jejich ochlazování o hodnotu ΔV_s , které se objevují změnou lineárních rozměrů. Zmenšení lineárních rozměrů ztuhlých částí ovlivňuje rozměry tvořící se dutin tím, že smršťující se vrstva se vmáčkne do taveniny a tím vyzvedne její hladinu.

Výsledkem uvedených pochodů je soustředná staženina, jejíž výsledný celkový objem pak je:

$$V_{st} = \Delta V'_L + \Delta V_{L-S} - \Delta V_s \quad (2.4)$$

Při tuhnutí odlitku ze slitiny s intervalem tuhnutí jsou probíhající změny v podstatě stejné, ale úbytek objemu ΔV_L se rozdělí mezi soustřednou staženinu V_{st} mezi dendritickou pórovitost V_{md} a vnitrodendritickou pórovitost V_{vd} .

$$\Delta V_{L-S} = V_{st} + V_v + V_{md} \quad (2.5)$$

Mezidendritické póry se vytváří při tuhnutí taveniny uzavřené mezi dendrity. Vnitrodendritické póry vznikají při tuhnutí taveniny uzavřené mezi větvemi dendritu. Z tohoto můžeme vztah (2.5) zjednodušit na:

$$\Delta V_{L-S} = V_{st} + V_v \quad (2.6)$$

Rozsah dendritické pórovitosti V_d je přímo úměrný šířce intervalu tuhnutí slitiny. Čím širší je tento interval, tím větší je rozsah dendritické pórovitosti. Tato skutečnost souvisí se schopností slitiny nahradit úbytek vlastního objemu při tuhnutí, tedy přefiltrovat se přes svoje

dvojfázové pásmo, protože pokud se mají $\frac{V_{st}}{\Delta V_{L-S}}$ kompenzovat ztráty objemu při tuhnutí, musí se tavenina profiltrovat do nejhlubší části dvojfázového pásma, a to vždy k souvislému povrchu tuhé fáze. Zvýšením intenzity ochlazování je možné na počátku tuhnutí výrazně zmenšit dvojfázové pásmo a tím i rozsah dendritické pórovitosti.

Vnitřní zdravost odlitku se hodnotí poměrem. Čím, více se tento poměr blíží K 1, tím je větší zdravost odlitku. Tento způsob hodnocení je důležitý, protože odstranění dendritické pórovitosti z odlitku neboli kompenzace objemu V_d je složitější, než kompozice objemových ztrát

staženiny

 V_{st} .

Odlitky ze slitin s úzkým intervalem tuhnutí se složením blízkým eutektickému (hliníkové bronzy, mosazi, siluminy) vytvářejí při tuhnutí soustředěné staženiny velkých rozměrů. U těchto slitin se vytváří pouze úzké dvoufázové pásmo, při kterém téměř nevzniká dendritická pórovitost. Dvoufázové pásmo nabývá na významu při tuhnutí odlitků ze slitin s širokým intervalem tuhnutí (cínové bronzy, slitiny Al – Mg, Al – Cu, Mg – Al). U těchto slitin jsou dány objemové změny staženinou malých rozměrů a poměrně rozsáhlou dendritickou pórovitostí. Výskyt mikrostaženin nezávisí pouze na intervalu tuhnutí dané slitiny, ale také na dalších činitelích, jakými jsou tepelná vodivost, měrná hmotnost slitiny v tuhém i tekutém stavu, rychlost ochlazování odlitku, teplota lití a velikost doplňovacího tlaku.

Hladina klesá do té doby, než se na stěnách odlitku vytvoří souvislá vrstva tuhého kovu až k povrchu hladiny. Od tohoto okamžiku začne klesající hladina zužovat svůj průměr a zvýší se rychlost jejího klesání. V tomto čase nastává úbytek objemu $\Delta V''_L$. Hodnota celkové změny objemu odlitku v kapalném stavu je:

$$\Delta V_L = \Delta V'_L + \Delta V''_L = \gamma_L \cdot (T_{lití} - T_L) \cdot V_0 \quad (2.7)$$

kde značí: V_0 - počáteční objem taveniny;

γ_L -průměrná hodnota součinitele objemového smrštění v teplotním intervalu

$T_{lití} - T_L$ [K⁻¹].

Objemové změny v tuhém stavu - smrštění odlitku v tuhém stavu se projevuje především změnou rozměrů, a proto se označuje jako lineární smrštění, nebo také jako tepelná dilatace. Pojem tepelná dilatace znamená souhrnnou změnu objemu (rozměrů) tuhé fáze v závislosti na teplotě a to při jejím chladnutí i ohřevu. Praktický význam lineárního smrštění

je, že určuje míru zmenšení odlitku oproti rozměrům formy a výrazně ovlivňuje velikost napjetí v odlitku. Změna rozměrů při ochlazování začíná v okamžiku vytvořením kostry s určitou pevností navzájem zaklíněných dendritů. Teplota, při které se vytvoří tato kostra, se nachází v teplotním intervalu tuhnutí slitiny a je teplotou začátku lineárního smrštění $T_{z.l.s.}$. Po úplném ztuhnutí odlitku se plynule zmenšují rozměry až do vychladnutí na teplotu okolního prostředí T_{op} . Dilatace odlitku bez působení odporů je volnou tepelnou dilatací. Volná objemová tepelná dilatace ΔV_S^V je dána vztahem:

$$\Delta V_S^V = \gamma_s \cdot (T_{z.l.s.} - T_{op}) \cdot V_0, \quad (2.8) \quad \text{Kde}$$

značí: V_0 - počáteční objem odlitku [m^3],

γ_s - průměrnou hodnotou součinitele objemového smrštění v intervalu teplot $T_L - T_S [K^{-1}]$.

Volná objemová dilatace je spojena se změnou lineárních rozměrů přibližně vztahem:

$$\Delta V_S^V \cong 3 \Delta l_V \quad (2.9)$$

Kde značí: Δl_V - hodnota úbytku rozměru odlitku,

rozměr odlitku l_V po jeho volném smrštění je dán vztahem:

$$l_V = l_z - \Delta l_V = l_z - l_z \cdot (T_{zls} - T_{op}) \quad (2.10)$$

Hodnota relativní (poměrné) volné dilatace ε_V je:

$$\varepsilon_V = \frac{l_z + l_V}{l_z} \cdot 100 = \alpha \cdot (T_{zls} - T_{op}) \cdot 100 \quad (2.11)$$

Kde značí: l_z - počáteční rozměr odlitku při teplotě $T_{z.l.s.}$, který se rovná rozměru formy [m],

l_V - rozměry odlitku po volné dilataci, tj. při teplotě okolního prostředí $T_{op} [m]$,

α - průměrná hodnota součinitel vhodného délkového smrštění v intervalu teplot,

$(T_{z.l.s.} - T_{o.p.}) [K^{-1}]$.

Smršťovací napětí je výsledkem odporu formy a jádra proti volné dilataci odlitku. Toto napětí je vždy tahové a dočasné. Působí pouze po dobu, kdy přetrvává mechanický odpor formy. Smršťovací napětí je příčinou vzniku trhlin.

Tepelné napětí je vyvolané rozdílnou rychlostí chladnutí, nebo ohřevu jednotlivých objemů odlitku. Tenké části se ochlazují rychleji než tlustší a to je příčinou neizotermického ochlazování odlitku jako celku. Části odlitku s různou teplotou mají i rozdílné rozměry, a proto si navzájem překáží při smrštění, což může zapříčinit vzniku prasklin. Tepelné napětí může být dočasné, nebo zbytkové.

Transformační fázové napětí vzniká v chladnoucím odlitku při fázové přeměně spojené se změnou specifického objemu a při neizotermickém chladnutí, tj. tedy když fázová přeměna neprobíhá současně v jednotlivých objemech odlitku. Může být dočasné, nebo zbytkové.

Uvedené rozdělení umožňuje klasifikaci příčin vyvolaných napětí v odlitku, i když prvotní příčinou všech napětí je vždy nerovnoměrná změna rozměru odlitku při jeho ochlazování. Každé napětí v odlitku se může projevit deformací, nebo porušením celistvosti. Deformace mohou být pružné (dočasné), nebo plastické (trvalé).

2.3 Fyzikální podstata teplotní roztažnosti kovů[15][3]

Vysvětlení teplotní roztažnosti kovů úzce souvisí s vnitřní strukturou materiálu, v tomto případě to jsou kmity atomů, které vznikají v důsledku tepelného zatažení materiálu. Jak je obecně známo, při teplotě absolutní nuly, jsou atomy kovů v rovnovážné vzdálenosti parametrů „a“ krystalické mřížky a také krystalická mřížka za těchto podmínek má určitou rovnovážnou energii, která odpovídá pružným napětím. Se vzrůstající teplotou při konstantním tlaku atomy více kmitají kolem rovnovážných poloh krystalické mřížce. Tím se od sebe uzlové body mřížky vzdalují, a tento jev se nazývá tzv. teplotní roztažnost kovů. energii potřebnou na kmitání atomů (resp. Kationů za předpokladu, že kovy jsou vodiče a elektrony tvoří elektronový mrak oddělený od atomů) mřížka získaná ohřevem teplejšího okolí. Při tomto ohřevu vznikají především objemové změny materiálu. Tyto změny způsobené zvýšením teploty při konstantním tlaku lze vyjádřit součinitelem objemové roztažnosti:

$$\gamma = \frac{1}{V} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (2.12)$$

kde značí: V – objem tělesa,
 ∂V - přírůstek objemu,
 ∂T - přírůstek teploty.

Součinitel teplotní roztažnosti γ se velmi špatně experimentálně zjišťuje, z tohoto důvodu je větší pozornost zaměřená na sledování délkové roztažnosti látek. Součinitel teplotní roztažnosti α lze stanovit na základě rovnice pro teplotní délkovou roztažnost:

$$\alpha = \frac{1}{l} \cdot \left(\frac{\partial l}{\partial T} \right)_p \quad (2.13)$$

kde značí: α – součinitel délkové roztažnosti,

l – délku měřeného tělesa,

∂l – délku měřeného tělesa,

∂T – přírůstek teplot tělesa.

U izotropních materiálů činí hodnota součinitele délkové teplotní roztažnosti jednu třetinu objemové roztažnosti ($\alpha = \gamma/3$).

Celková změna rozměru délky při ohřevu tělesa z teploty T_0 na teplotu T_1 je dána vztahem:

$$l = l_0 \cdot \exp \left(\int_{T_0}^{T_1} \alpha(t) \cdot dT \right) \quad (2.14)$$

Pro podmínky $\alpha = \text{konst.}$ Se rovnice (2.14) zjednodušuje do tvaru:

$$l = l_0 \cdot \exp [1 + \alpha(T_1 - T_0)] \quad (2.15)$$

Pro malé hodnoty součinitele teplotní roztažnosti $\alpha < 10^{-4}[\text{K}^{-1}]$, lze experimentálně rozložit do řady a lze omezit se na členy rozvoje:

$$l = l_0 \cdot [1 + \alpha(T_1 - T_0)] \quad (2.16)$$

kde značí: l_0 – počáteční délka sledovaného tělesa,

T_1 – okamžitou teplotu tělesa,

T_0 – počáteční teplota tělesa.

Rovnice (2.16) má uplatnění v technické praxi pro vyjádření teplotní roztažnosti probíhající v malém intervalu teplot cca 30 °C, max. 50 °C. Pracujeme-li ve větším teplotním

rozsahu, pak je třeba použít parabolický rozvoj pro stanovení výsledné délky zahřívaného (dilatačního tělesa):

$$l = l_0[1 + \alpha_1(T_1 - T_0)^1 + \alpha_2(T_1 - T_0)]^2 \quad (2.17)$$

Kde: α_1 – součinitel teplotní roztažnosti pro nižší teploty tělesa,

α_2 – součinitel teplotní roztažnosti pro vyšší teploty tělesa.

Pro fyzikálně důležité látky, tj. především pro kovy a jejich slitiny, jsou hodnoty součinitele teplotní roztažnosti tabelovány. Jsou-li známe závislosti délky na teplotě, lze derivací vypočítat teplotní roztažnost:

$$\alpha = \frac{l}{l_0} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T} = \frac{l}{l_0} \cdot \frac{l_1 - l_0}{T_1 - T_0} \quad (2.18)$$

Pro matematické úpravě vztahu (2.18) lze získat rovnici pro stanovení změny délky v důsledku teplotní roztažnosti tělesa:

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot (T_1 - T_0) \quad (2.19)$$

V případě materiálu anizotropních se zavádí dva součinitele teplotní roztažnosti a to ve směru hlavní osy tělesa (α_1) a součinitele (α_2) ve směru kolmém. Na základě těchto dvou hodnot se zavádí tzv. průměrný součinitel teplotní roztažnosti: $[\alpha^* = (\alpha_1 + 2\alpha_2)/3]$. Hodnoty tohoto součinitele se u polykrystalických materiálů shodují s hodnotami měřené délkové roztažnosti. Obecně platí, čím je větší hodnota teploty tání, tím nižší je hodnota součinitele teplotní roztažnosti. Hodnoty délkové roztažnosti u kovů se pohybují okolo $10^{-6}[\text{K}^{-1}]$ a jsou tím větší, čím je nižší teplota tání.

Odborné poznatky uvedené v této části diplomové práce byly využity při řešení vlastních experimentů.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Experimentální část je zaměřena na sledování rozměrových změn během tuhnutí slitiny zinku. Experimenty prováděné v této práci byly tedy zaměřeny na sledování časových závislostí dilatačních křivek při odlévání, tuhnutí a chladnutí odlitků.

K tomuto účelu byl použita slitina zinku 430. Chemické složení používaného materiálu odpovídá složení běžného zinku pro tlakové lití řídících se normou ČSN. Měření probíhalo při gravitačním lití do studené kovové formy, 3x se zátěží pružiny a 3x bez zátěže pružiny, při odlévací teplotě 530°C. Rozměry získaných odlitků tvaru profilu I znázorněno na obr. 3-1. Všechny experimenty byly provedeny, na pracovišti Katedry strojírenské technologie TU v Liberci.



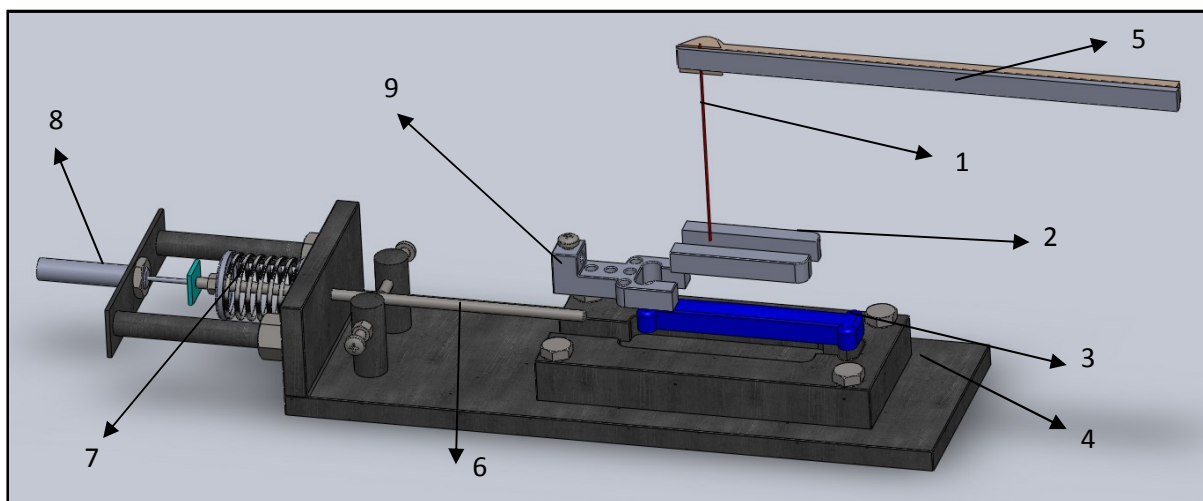
Obr. 3-1 Odlitek zkušební vzorku Zn430

3.1 Charakteristika měřicího zařízení

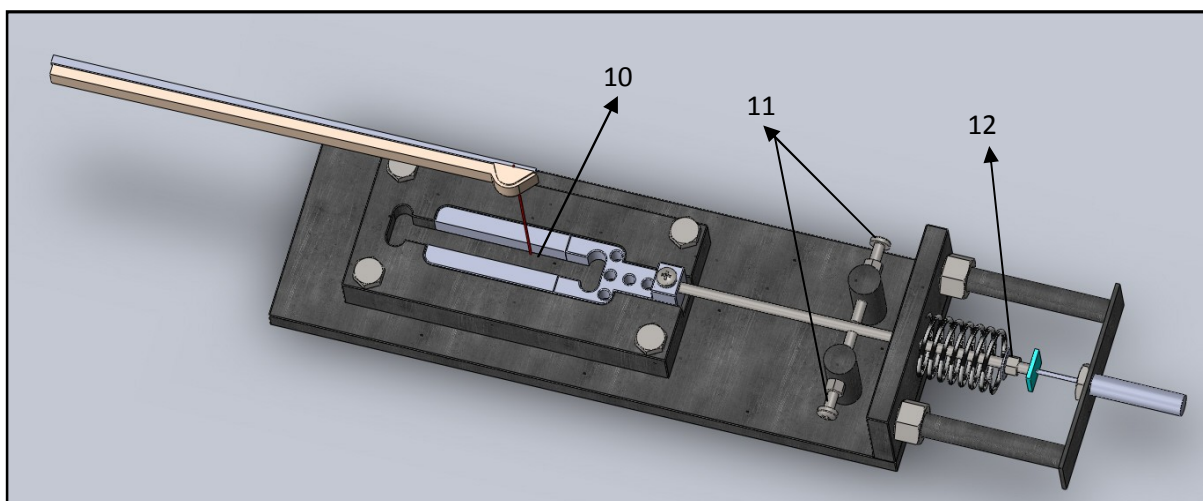
K měření dilatačních změn slitin zinku bylo použito měřicí zařízení, které se skládá ze tří základní částí:

- a) měřicí rám s čidly teploty a polohy
- b) dilatometr CRYSTALDIAGRAPH PC-4T2L (A/D převodník)
- c) PC s programovým vybavením pro zpracování naměřených hodnot

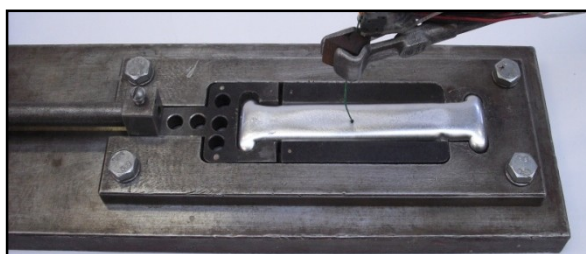
Toto zařízení umožňuje současně provádět termickou i dilatometrickou analýzu tuhnutí odlitku. Na obr. 3-2 a 3-3 je schéma tohoto zařízení.



Obr. 3-2 a) měřicí rám s čidly teploty a polohy. Na modelu jsou zobrazeny hlavní části měřicího rámu. 1 – čidlo; 2 – kovová část dutiny; 3 – odlitek ve tvaru I; 4 – rám; 5 – rameno držící čidlo; 6 – vodící tyč; 7 – tlačná pružina; 8 – měřicí čidlo dilatace; 9 – pohyblivá kovová tvarová deska.



Obr. 3-3 b) 10 – kovová dutina formy; 11 – regulační šrouby 12 – matice.



3-5 Tuhnoucí odlitek v kovové formě s čidly

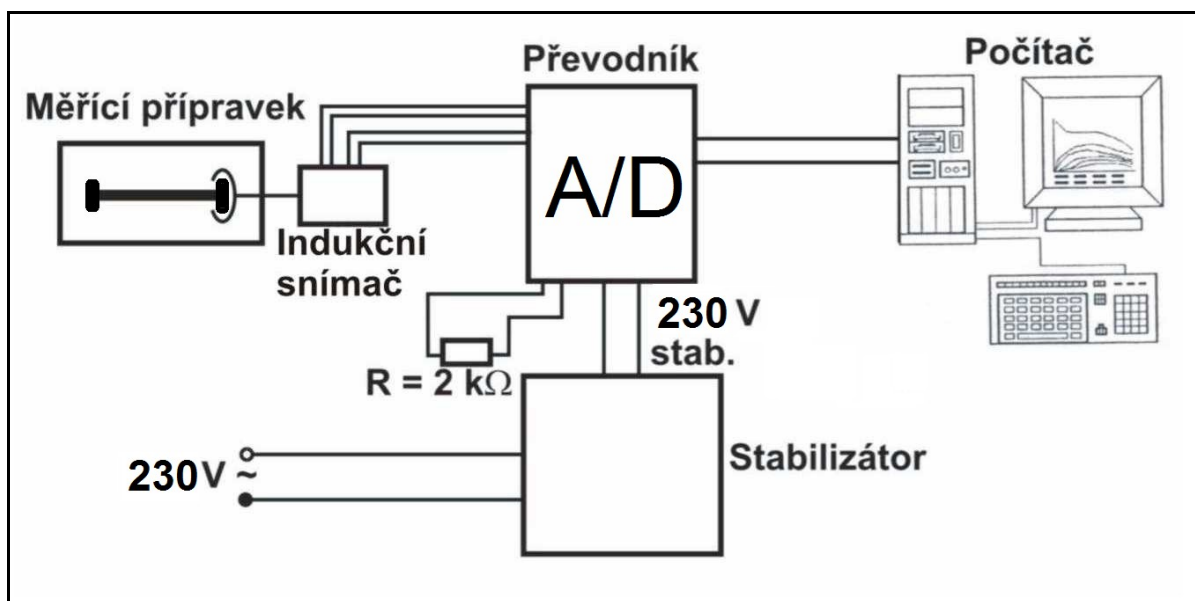


Obr. 3-4 Prázdná kovová forma s čidly

Měřicí rám je jedinou mechanickou částí celého měřicího zařízení. Byl zkonstruován na TU Liberec a je sestaven: z rámu, pružiny o průměru 5,6[mm] a tuhosti 20,1[N/mm], vodící tyči, jenž přenáší pohyb na čidlo. Rozkladatelnou kovovou formou na 2 části, která je přišroubovaná k hlavnímu rámu čtyřmi šrouby. Doprostřed formy je umístěno čidlo, které je podepřeno ramenem a vede do A/D převodníku. Kde následovně zpracovává okamžitou teplotu a předává signál dál přes standardní sériový port do počítačového softwaru polské výroby ATD. Počítačový program používá standardní MS-DOS prostředí. Navzdory nízkým hardwarovým nárokům zvládá tento program i velmi důležité funkce pro hodnocení měření jako například:

- uložení naměřených hodnot do datového souboru*.DAT, které jsou kompatibilní s většinou rozšířených výpočtových programů
- výpočet, grafické zobrazení a uložení 1. a 2. časové derivace naměřených křivek
- zpětné načtení souborů s daty

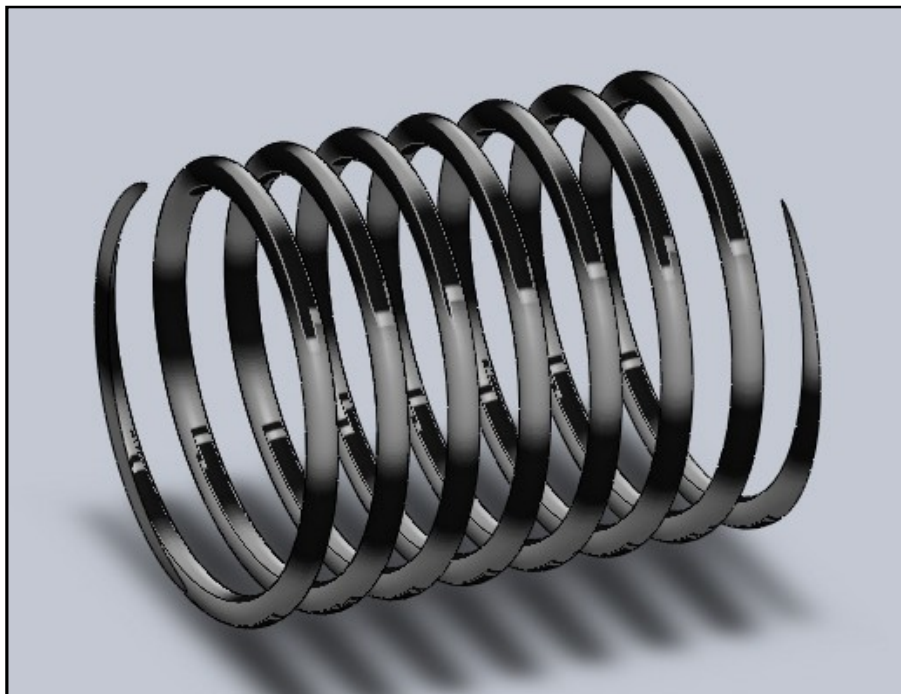
Popis sledování rozměrových změn při tuhnutí a chladnutí odlitků ze slitiny zinku.



Obr. 3-6 Na obrázku je zobrazeno schéma pro měření volného smrštění odlitku

Experimenty prováděné za účelem sledování rozměrových změn při tuhnutí a chladnutí odlitků ze slitin zinku byly rozděleny do dvou etap.

První etapa - byla provedena měření rozměrových změn, při tuhnutí odlitků v kovové formě s přítlačnoupružinou o průměru 54,5 [mm] a tuhosti 20,1 [N/mm]. K tomuto účelu byl použita slitina zinku (Zn 430), která byla odlévána do formy o teplotě cca 530 °C.



Obr. 3-7 Přítlačná pružina

Druhá etapa - byla provedena měření rozměrových změn, při tuhnutí odlitků v kovové formě bez pružiny. K tomuto účelu byl, použita slitina zinku (Zn 430), která byla odlévána do formy o teplotě cca 530 °C.

3.2 Příprava taveniny na experimentální část

Příprava taveniny experimentálního materiálu ZN430 byla prováděna v elektrické odporové peci, byly použity grafitové kelímky. Pro každou ze tří odlévaných slitin byl použit samostatný kelímek. Po natavení byla tavenina metalurgicky ošetřena, z povrchu taveniny byla stažena struska a byla změřena teplota digitálním teploměrem GTH 1100 (Digital Thermometer, termočlánek NiCr-Ni). Při výše uvedené teplotě byla tavenina odlita do připravené slévárenské formy. Zároveň bylo dbáno nato, aby rozdíly teplot lití jednotlivých odlévaných vzorků byly minimální.



Obr. 3-8 Elektrická Indukční pec, ve které byla připravována tavenina



Obr. 3-9 Na obrázku je zobrazen svazek termočlánku Ni-CrNi



Obr. 3-10 Pohled na keramický kelímek s taveninou Zinku ZN430

Před vlastním odlitím bylo sestaveno a připraveno k měření měřicí zařízení. Byly zkontrolovány funkce a správné nastavení měřícího čidla dilatace. Též byla zkontrolována správná funkce termočlánku, který byl přesně ustaven do prostřed formy a byl zhotoven z drátu o průměru 0,4 mm, aby mohl snímat teplotu v tepelné ose odlitku. Dále byl nastaven měřicí program podle parametrů zkoušky (licí teplota, doba trvání měření, teploty započetí a ukončení měření).

Po nalití taveniny do předem připravené formy, došlo při překročení dané teploty k automatickému startu záznamu hodnot dilatace a teploty. Při lící teplotě 530 °C byla zvolena teplota startu měření 420 °C, při teplotě lití 530 °C. Četnost záznamu programu byla v intervalech 1,2 sekundy. Po započetí měření byla sledována časová závislost změny rozměru tuhnoucího a chladnoucího odlitku a současně také časová změna teploty v tepelné ose odlitku.

3.3 Postup provedeního experimentu

Do připravené dutiny formy byl zaveden termočlánek Ni-CrNi o průměru 0,2x 150 mm. Termočlánek byl usazen do tepelné osy odlitku. Po té bylo skontrolována správnost a funkčnost měřicího zařízení. Následovalo odlévání do předem připravené formy. Než bylo odléváno do formy byla odstraněna z taveniny slitiny zinku stažná struska a byla změřena teplota. Odlévání použité slitiny zinku Zn430 probíhalo při teplotě 550 °C.



Obr. 3-11 Sledování tuhnutí slitiny zinku Zn430 ve formě



Obr. 3-12 Naměřené vzorky ve tvaru I ze slitiny zinku Zn430

Tab.3-1 Přehled provedených experimentů – sledování volné dilatace s tlačnou pružinou

| Číslo měření | Značka slitiny | Druh formy | Teplota liti [°C] | Označení experimentu |
|--|----------------|------------|-------------------|----------------------|
| Kovová forma s pružinou, teplota formy $20 \pm 10^\circ\text{C}$, teplota odlévání $450 \pm 10^\circ\text{C}$ | | | | |
| 1 | Zn 430 | Kovová | 450 | D97A0182.DAT |
| 2 | Zn 430 | Kovová | 450 | D97A0183.DAT |
| 3 | Zn 430 | Kovová | 450 | D97A0184.DAT |

Tab.3-2 Přehled provedených experimentů – sledování volné dilatace bez tlačné pružiny

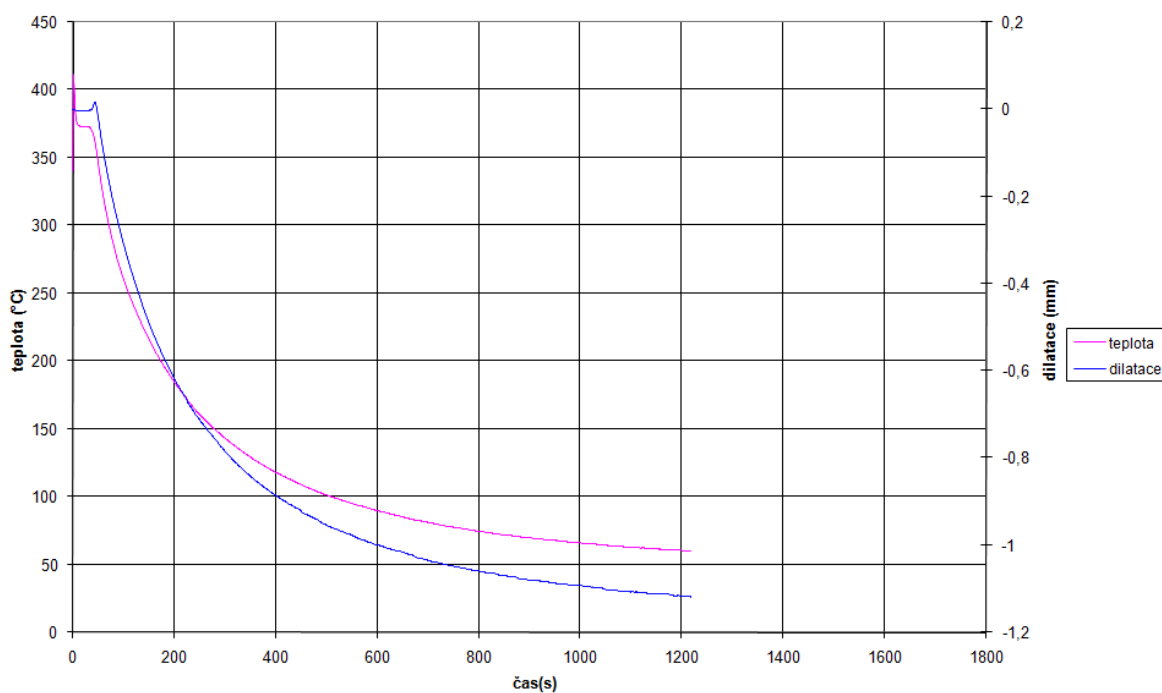
| Číslo měření | Označení slitiny | | Teplota lití [°C] | Označení experimentu |
|--|------------------|-----------|-------------------------|-------------------------|
| <i>Kovová forma bez pružiny, teplota formy 20±10°C, teplota odlévání 450 ±10°C</i> | | | | |
| 1 | Zn 430 | ZnAl3Cu3 | 450 | D97A0185.DAT |
| 2 | | | | D97A0186.DAT |
| 3 | | | | D97A0187.DAT |
| <i>Kovová forma bez pružiny, teplota formy 20±10°C, teplota odlévání 450 ±10°C</i> | | | | |
| 4 | Zn 410 | ZnAl4Cu1 | 450 | D12B0704.DAT |
| 5 | | | | D12B0706.DAT |
| 6 | | | | D12B0709.DAT |
| <i>Kovová forma bez pružiny, teplota formy 20±10°C, teplota odlévání 450 ±10°C</i> | | | | |
| 7 | Zn 830 | ZnAl18Cu1 | 450 | D12B0702.DAT |
| 8 | | | | D12B0707.DAT |
| 9 | | | | D12B0710.DAT |
| <i>Kovová forma bez pružiny, teplota formy 20±10°C, teplota odlévání 450 ±10°C</i> | | | | |
| 10 | Zn 1110 | ZnAl11Cu1 | 450 | D12B0705.DAT |
| 11 | | | | D12B0708.DAT |
| 12 | | | | D12B0711.DAT |

Tyto hodnoty se v reálném čase zobrazovaly v měřícím programu na monitoru počítače a okamžitá teplota byla přímo vykreslována do grafu $T=T(t)$ (závislost teploty na čase). Zápis se automaticky ukončil při dosažení koncové teploty měření, která byla zvolena 60°C . Získané hodnoty teploty, dilatace, poměrné dilatace a byly automaticky uloženy do souboru ve formát*.dat.

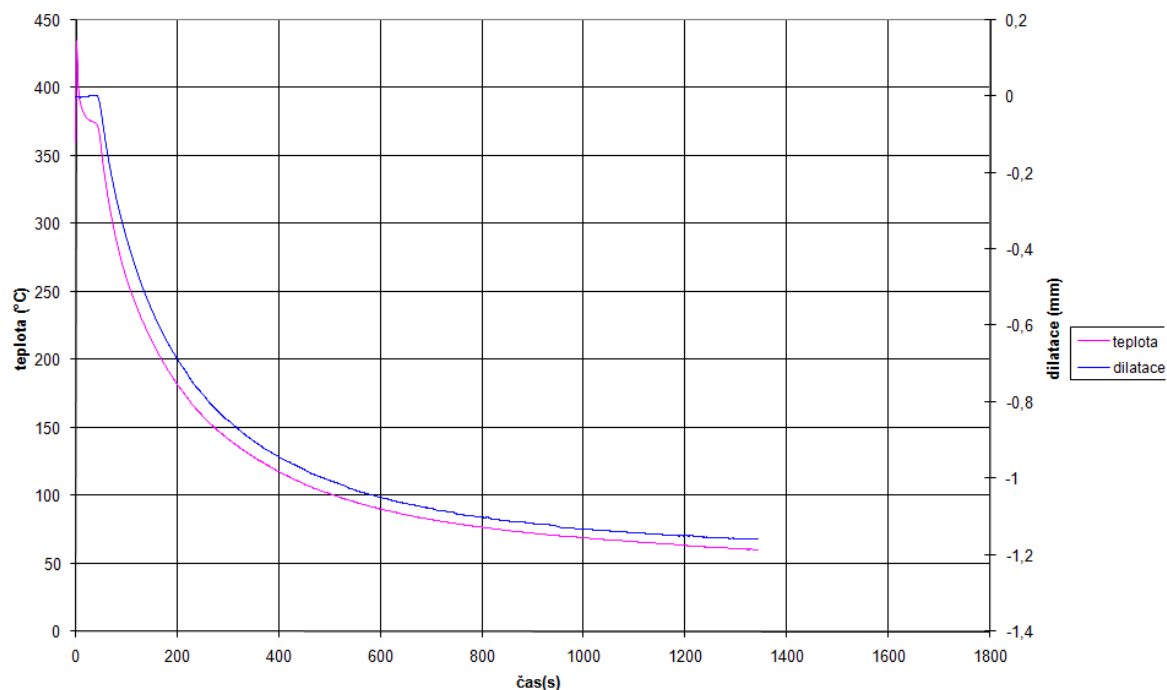
Uvedené soubory byly dále zpracovány pomocí programu pro měření. Byly provedeny derivace dilatace $\Delta \dot{d} = \frac{d\Delta d(t)}{dt}$ a teplot $\dot{T} = \frac{dT(t)}{dt}$. Hodnoty, které vznikli, při těchto operacích byly uloženy též ve formátu*.dat. Tyto hodnoty se dále přenesly do programu MS Excel a zde se z výsledných hodnot vytvořily grafické závislosti.

3.4 Hodnocení výsledků měření

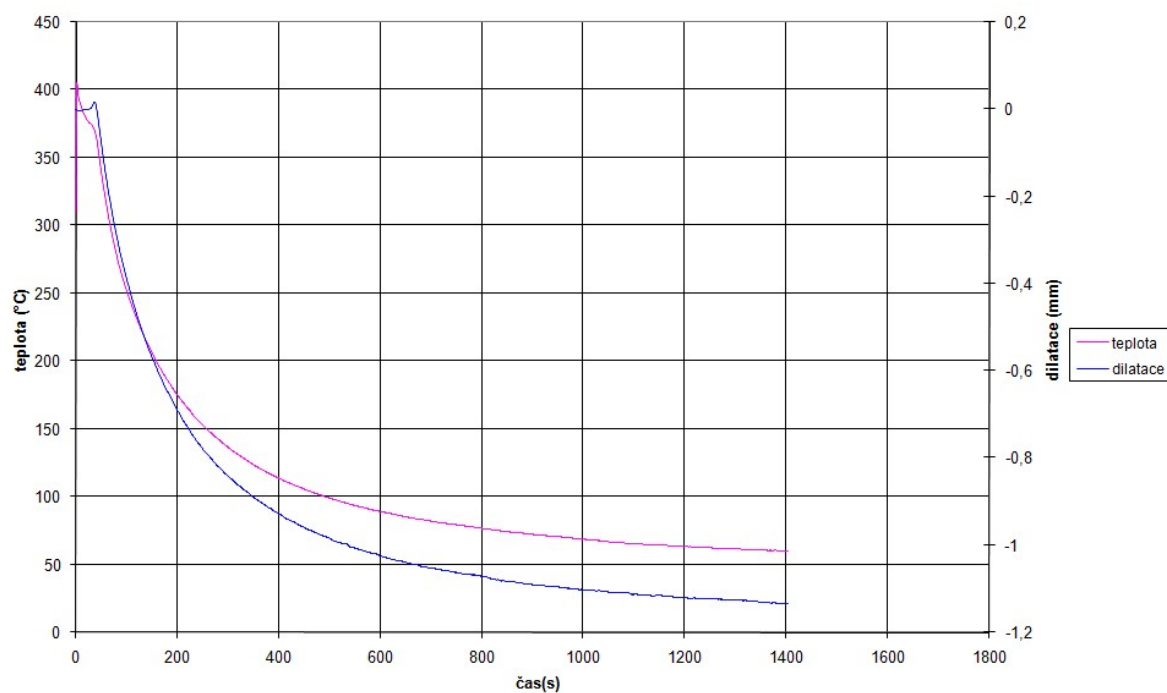
Nejprve byla vyhodnocena závislost materiálů pro experiment, tedy slitina zinku Zn 430. Hodnoty pro slitinu zinku jsou znázorněny v tabulce tab. 3-1 a 3-2 Pro porovnání jednotlivých dilatačních charakteristik zobrazují grafy s dilatačními křivkami všech vzorků dané slitiny doplněných křivkou chladnutí. Dále jsou vyhodnoceny závislosti dilatační charakteristiky slitiny zinku podle prováděného experimentu, tedy podle materiálu použité slévárenské formy a dále pak podle zadaných parametrů jako teplota lití. V tab. 3-3 až 3-9 Jsou uvedeny průměrné hodnoty teplot a dilatace ze všech měření pro slitinu zinku Zn430.



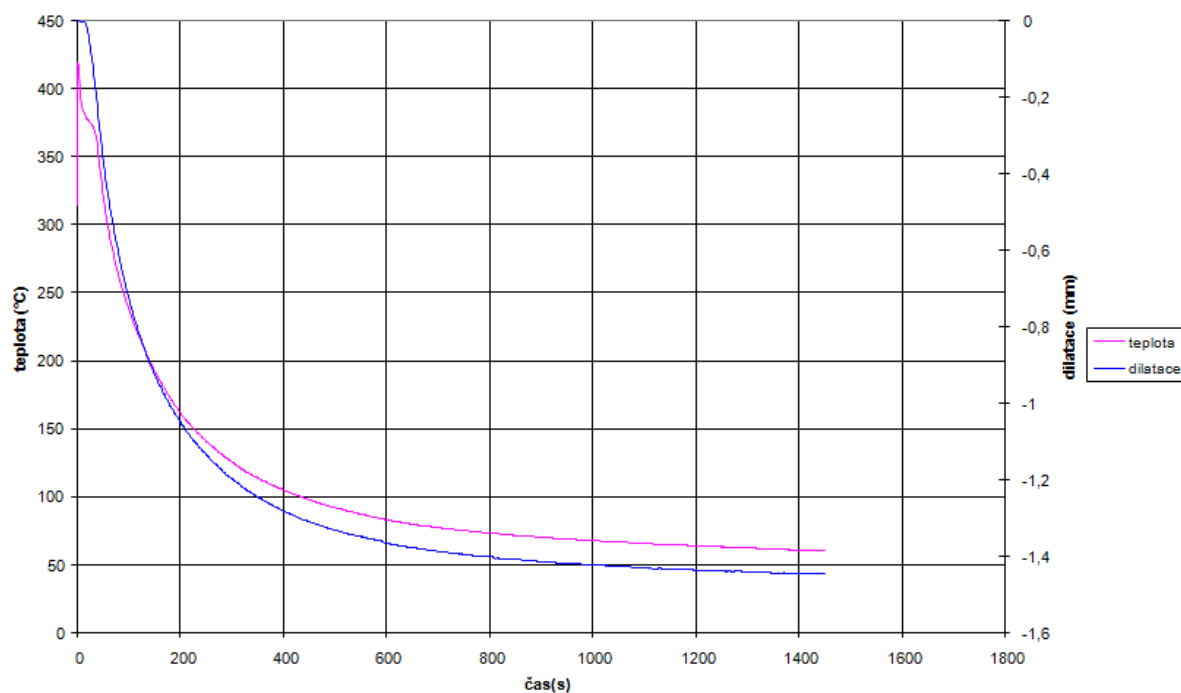
Obr. 3-13 Prvá časová závislost dilatace zinku Zn430 ve tvaru I s přítlačnou pružinou při teplotě lití 450 °C



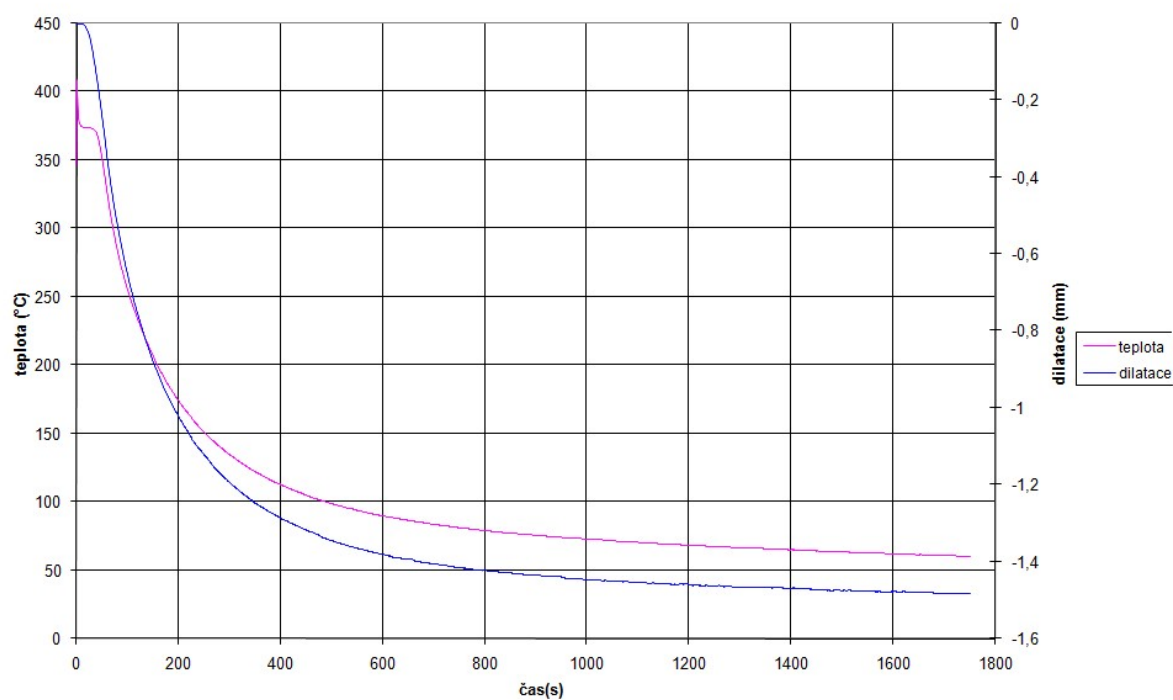
Obr. 3-14 Druhá časová závislost dilatace zinku Zn430 ve tvaru I s přitlačnou pružinou při teplotě lití 450 °C



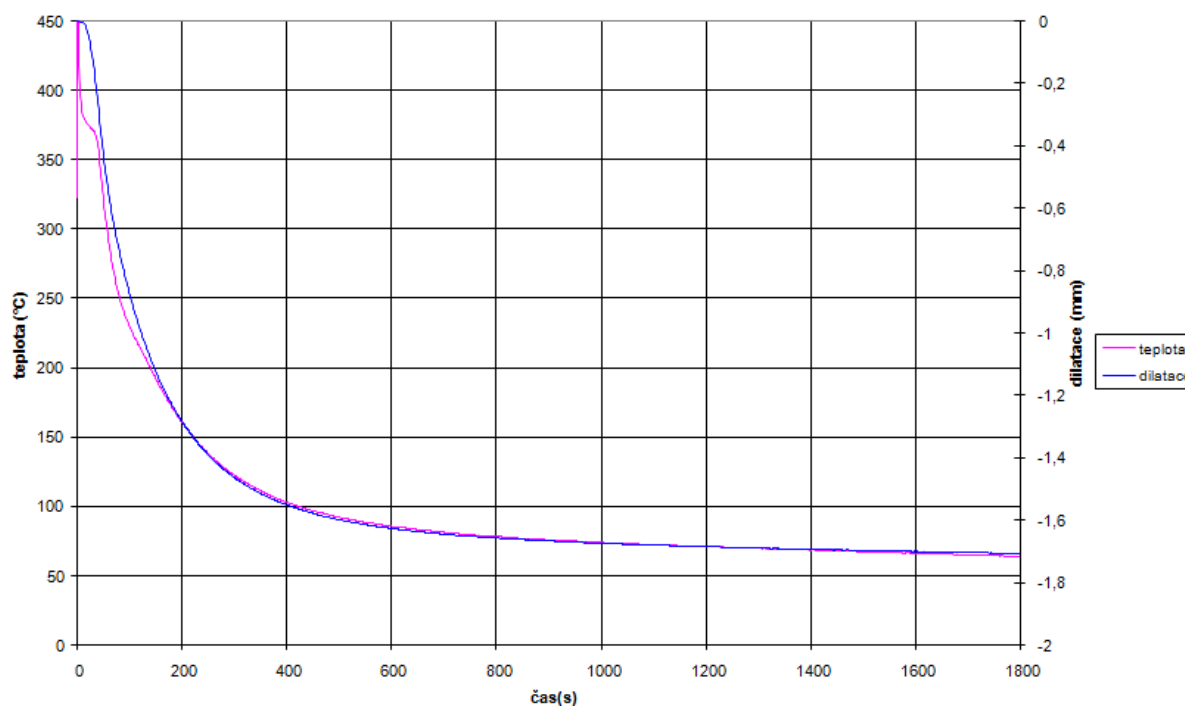
Obr. 3-15 Třetí časová závislost dilatace zinku Zn430 ve tvaru I s přitlačnou pružinou při teplotě lití 450 °C



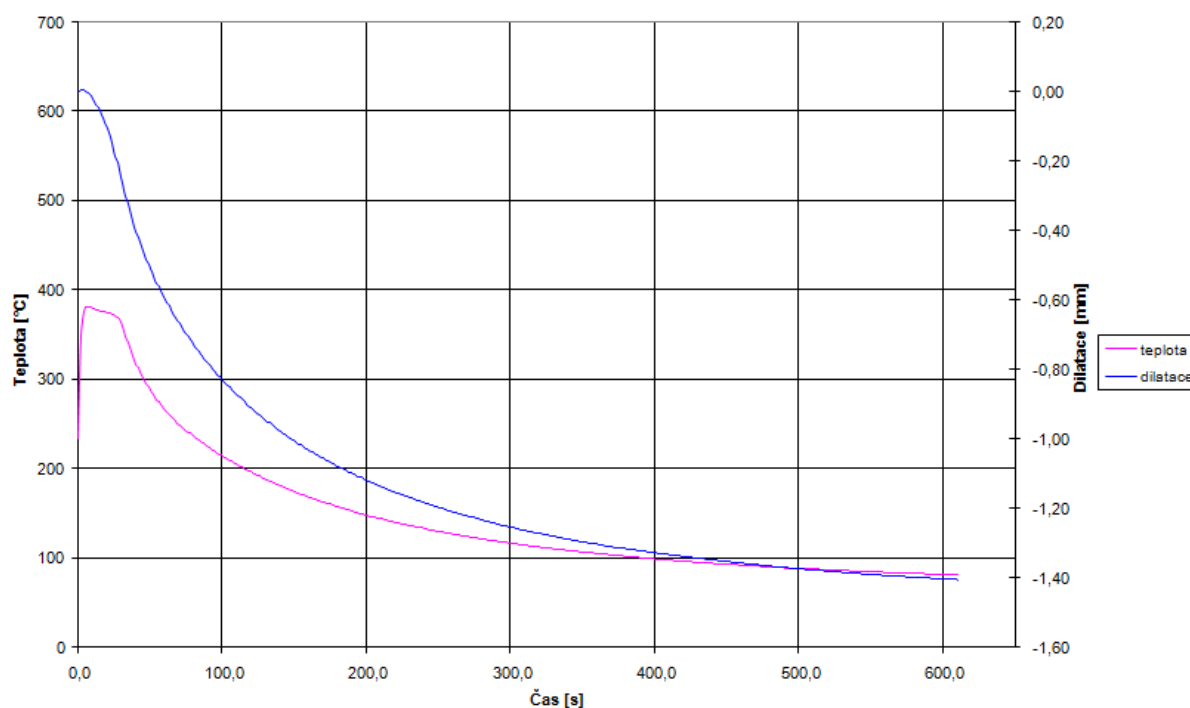
Obr. 3-16 Prvá Časová závislost dilatace slitiny zinku Zn430 ve tvaru I bez zátěže přítlačné pružiny při teplotě lití 450 °C



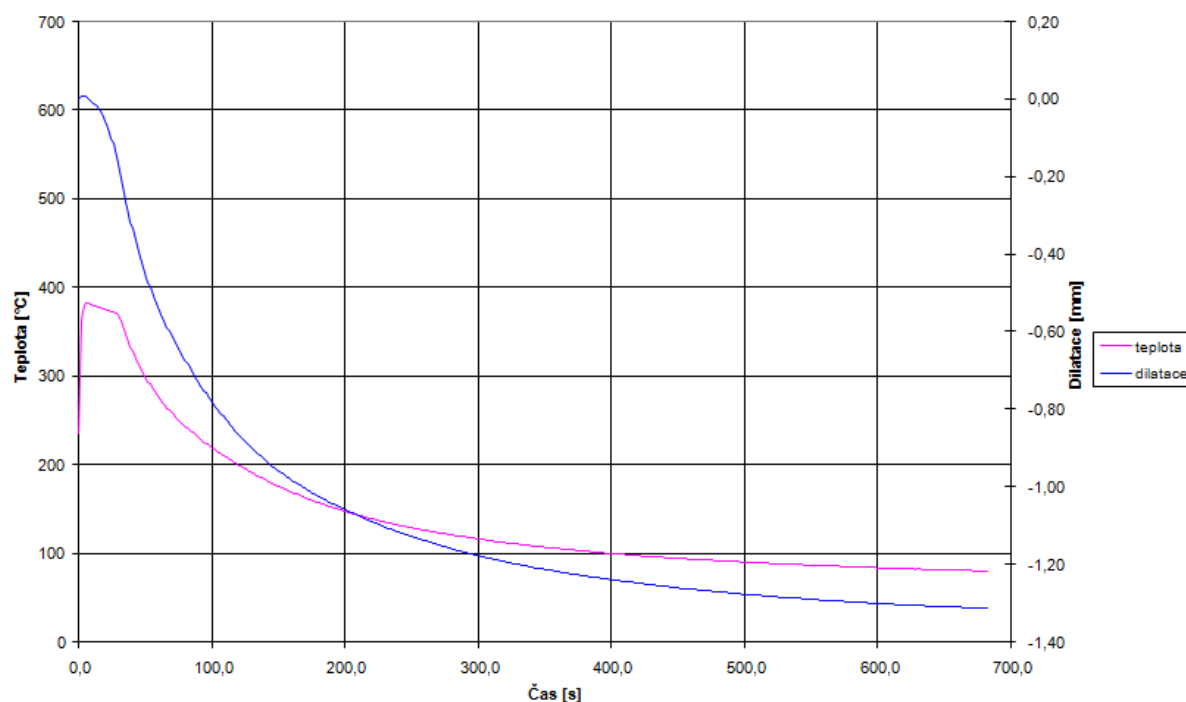
Obr. 3-17 Druhá Časová závislost dilatace slitiny zinku Zn430 ve tvaru I bez zátěže přítlačné pružiny při teplotě lití 450 °C



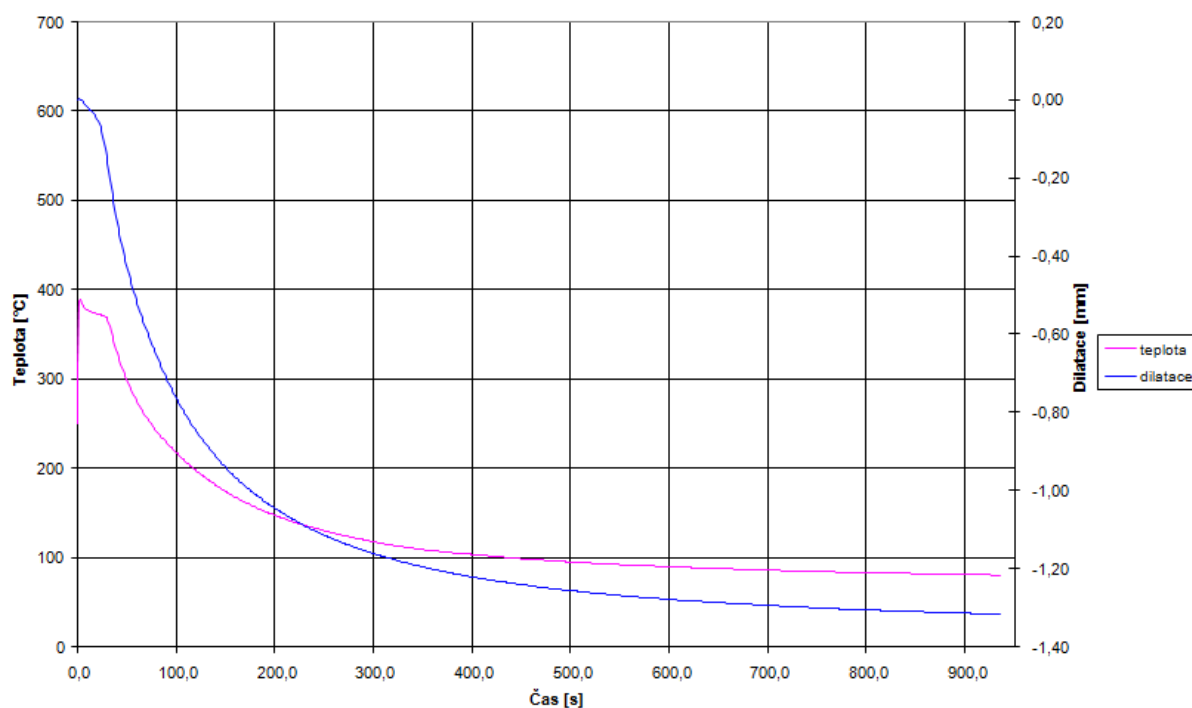
Obr. 3-18 Třetí časová závislost dilatace slitiny zinku Zn430 ve tvaru I bez zátěže přitlačné pružiny při teplotě lití 450 °C



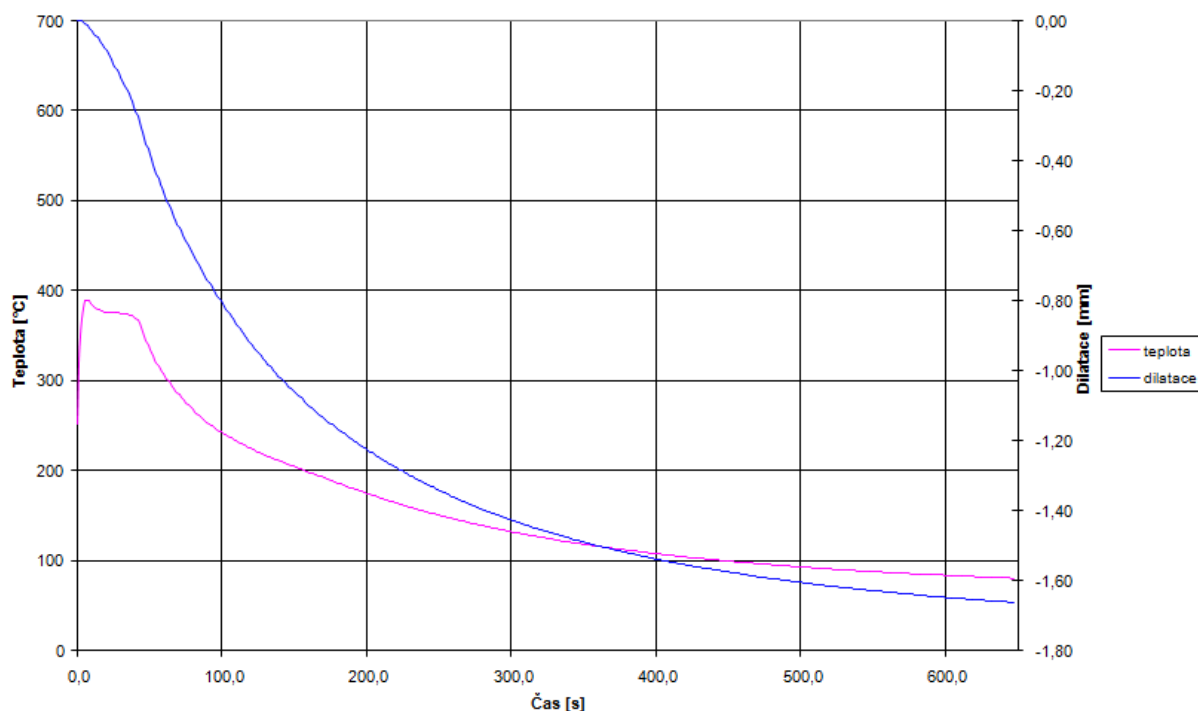
Obr. 3-19 čtvrtá časová závislost dilatace zinku ZnAl4Cu1 ve tvaru I s bez zátěže přitlačné pružiny při teplotě lití 450 °C



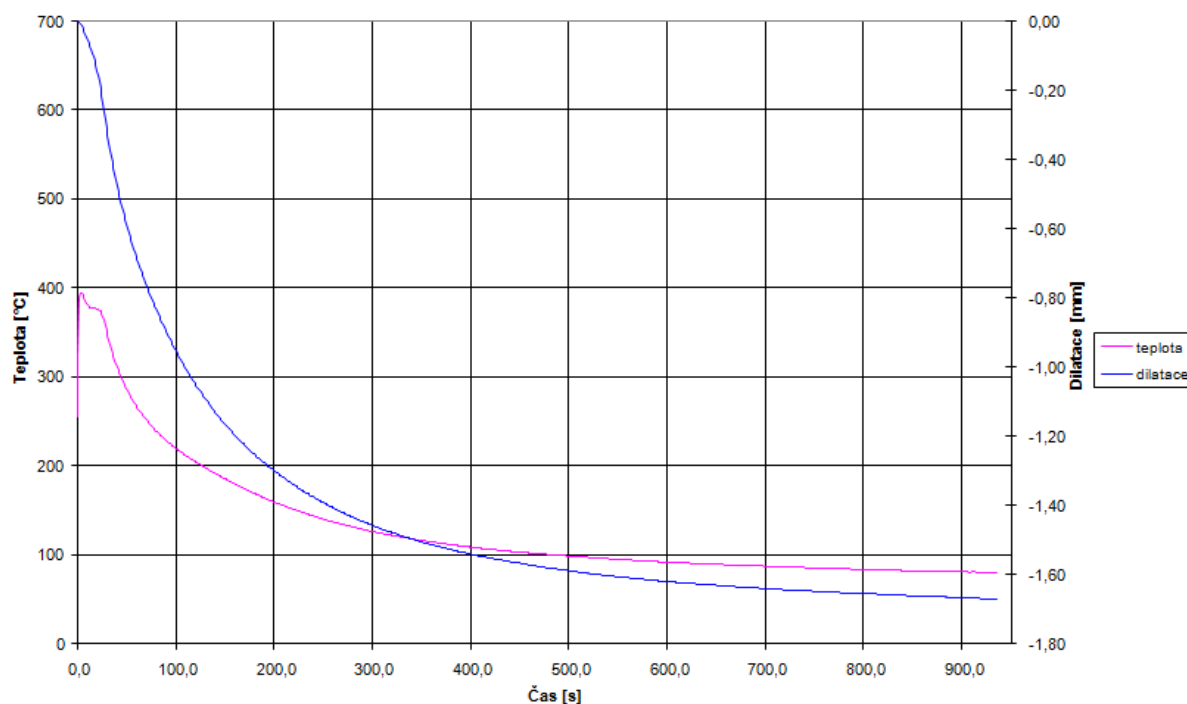
Obr. 3-20 pátá časová závislost dilatace zinku $ZnAl_4Cu_1$ ve tvaru I s bez zátěže přitlačné pružiny při teplotě lití $450\text{ }^{\circ}\text{C}$



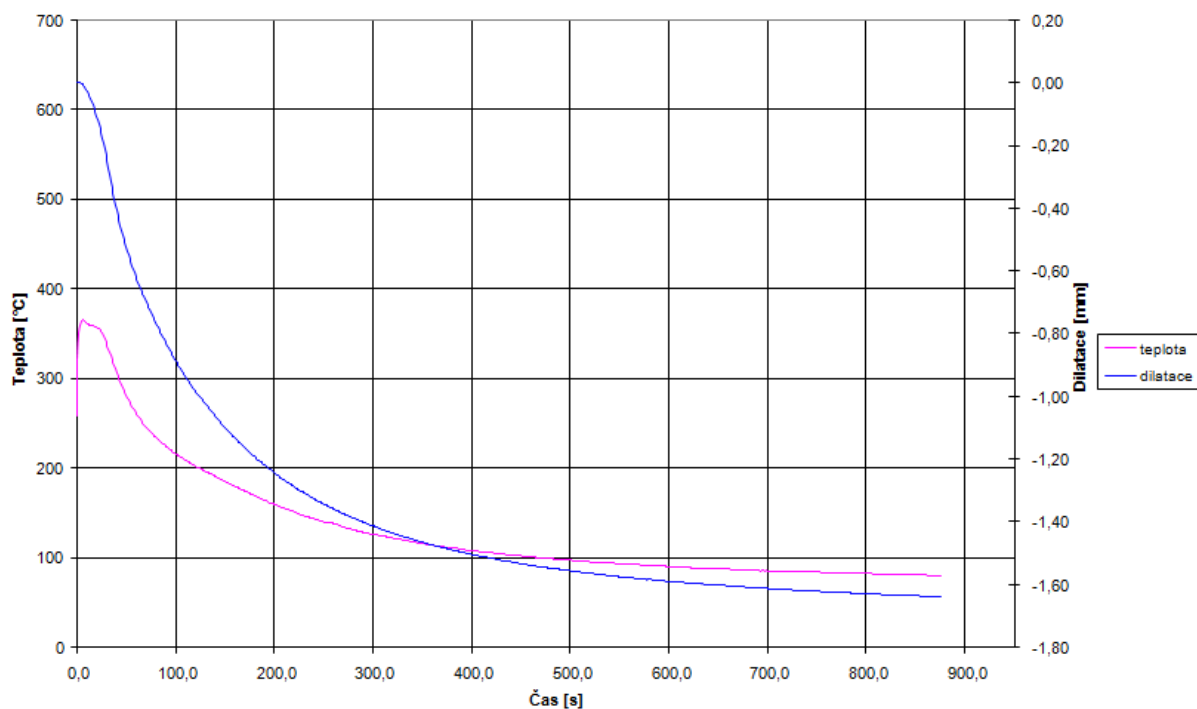
Obr. 3-21 šestá časová závislost dilatace zinku $ZnAl_4Cu_1$ ve tvaru I s bez zátěže přitlačné pružiny při teplotě lití $450\text{ }^{\circ}\text{C}$



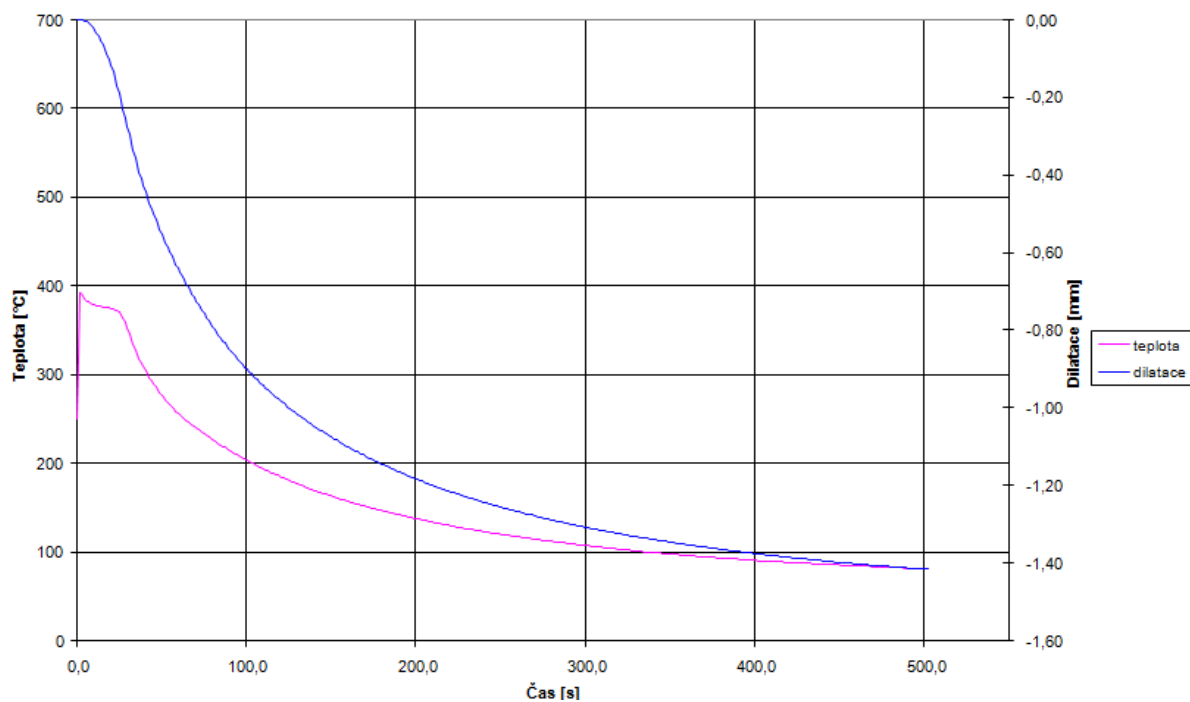
Obr. 3-22 sedmá časová závislost dilatace zinku ZnAl18Cu1 ve tvaru I s bez zátěže přitlačné pružiny při teplotě lití 450 °C



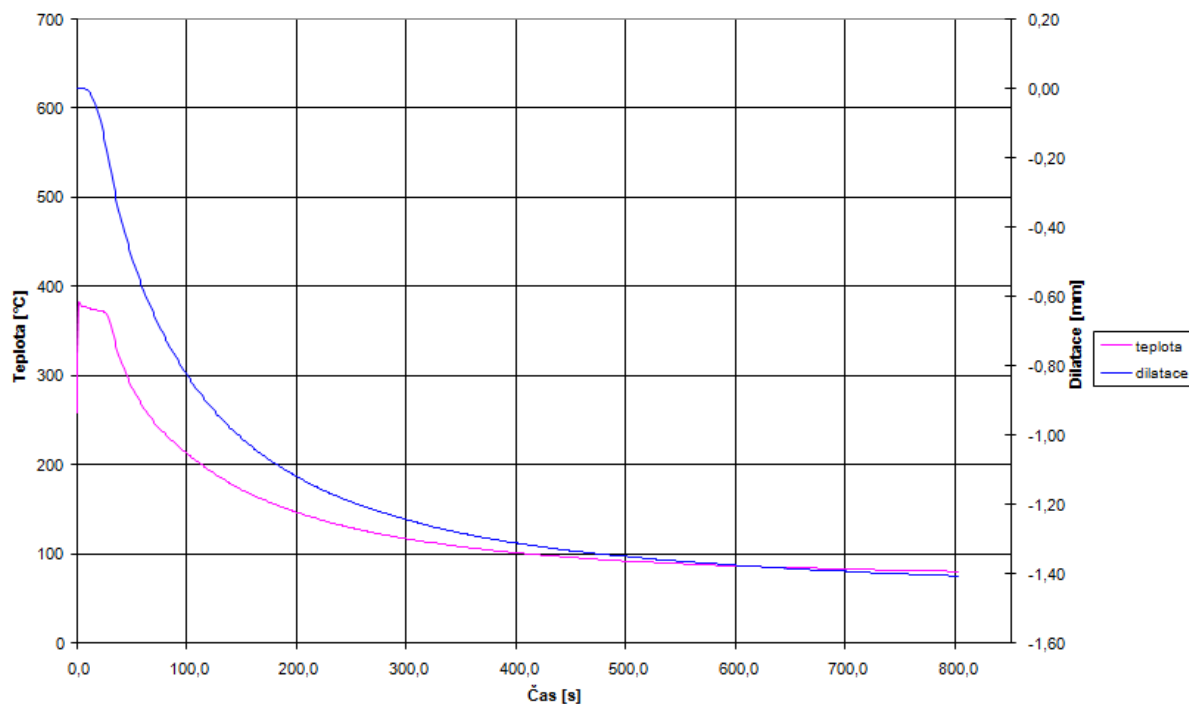
Obr. 3-23 osmá časová závislost dilatace zinku ZnAl18Cu1 ve tvaru I s bez zátěže přitlačné pružiny při teplotě lití 450 °C



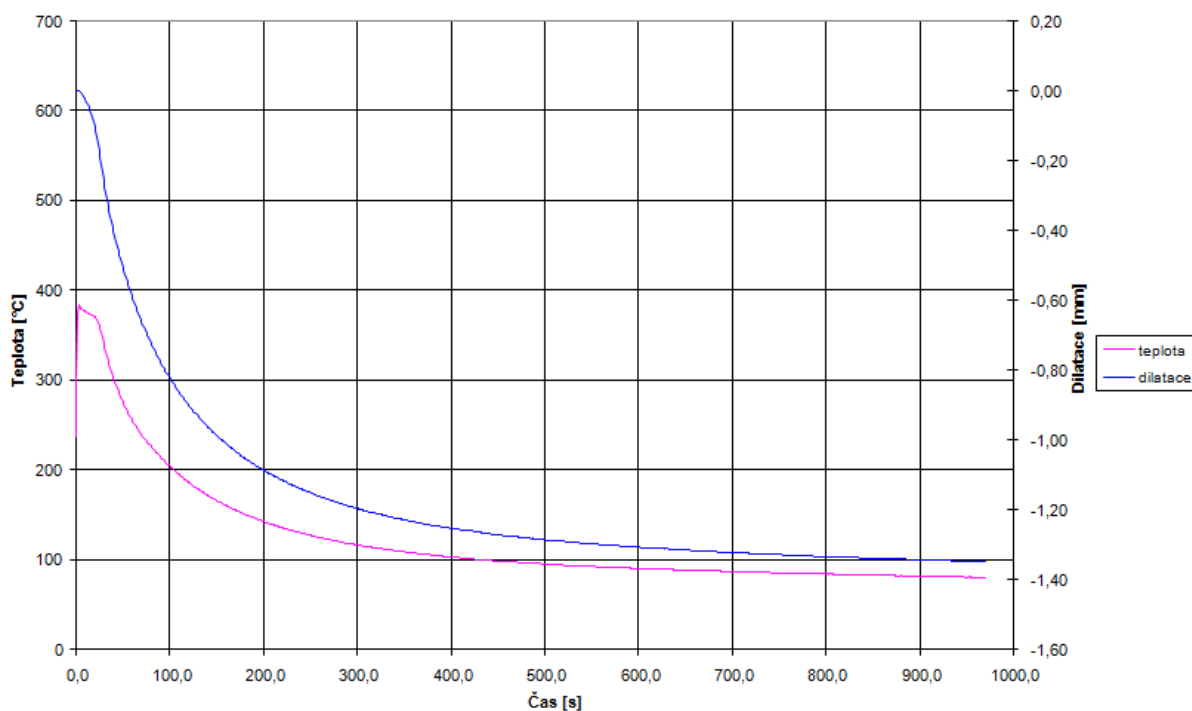
Obr. 3-24 devátá časová závislost dilatace zinku ZnAl18Cu1 ve tvaru I s bez zátěže přítlačné pružiny při teplotě lití 450 °C



Obr. 3-25 desátá časová závislost dilatace zinku ZnAl11Cu1 ve tvaru I s bez zátěže přítlačné pružiny při teplotě lití 450 °C



Obr. 3-26 jedenáctá časová závislost dilatace zinku ZnAl11Cu1 ve tvaru I s bez zátěže přitlačné pružiny při teplotě liti 450 °C



Obr. 3-27 dvanáctá časová závislost dilatace zinku ZnAl11Cu1 ve tvaru I s bez přitlačnépružiny při teplotě liti 450 °C

3.4.1 Výpočet součinitele teplotní roztažnosti

Na základě naměřených hodnot z provedených experimentů volného smrštění odlitků byl ustanoven vzorec:

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

Kde je: Δl – změnou lineárního rozměru sledovaného tělesa [mm];

α – součinitel teplotní roztažnosti [K^{-1}]

ΔT – Změna teploty [$^{\circ}C$]

Odvození teplotního součinitele α : $\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T} [K^{-1}]$, délka formy $l_0 = 157$ mm

Vypočítané hodnoty α jsou uvedeny v tabulkách 3-3 až 3-16

Tabulka 3-3 Hodnoty součinitele teplotní dilatace (smrštivosti) α získané na základě chlazení odlitku slitiny Zn430 včetně teplotního rozsahu a hodnoty dilatace.

| Měření č. 1 – slitina Zn430 – přítláčná pružina | | | |
|---|-------------------------|--|---|
| Číslo rozsahu teplot | Teplota [$^{\circ}C$] | Dilatace (smrštění) teplot Δl [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti α [K^{-1}] |
| 1 | 400-450 | $-5,51 \cdot 10^{-4}$ | $-7,01 \cdot 10^{-8}$ |
| 2 | 350-400 | $-1,23 \cdot 10^{-4}$ | $-1,57 \cdot 10^{-8}$ |
| 3 | 300-350 | -0,0888 | $-1,13 \cdot 10^{-5}$ |
| 4 | 250-300 | -0,2650 | $-3,37 \cdot 10^{-5}$ |
| 5 | 200-250 | -0,4610 | $-5,87 \cdot 10^{-5}$ |
| 6 | 150-200 | -0,6663 | $-8,48 \cdot 10^{-5}$ |
| 7 | 100-150 | -0,8738 | $-1,11 \cdot 10^{-4}$ |
| 8 | 50-100 | -1,0617 | $-1,35 \cdot 10^{-4}$ |
| 9 | 50-500 | -0,8746 | $-1,11 \cdot 10^{-4}$ |

Tabulka 3-4 Hodnoty součinitele teplotní dilatace (smrštivosti) α získané na základě chladnutí odlitku slitiny Zn430 včetně teplotního rozsahu a hodnoty dilatace.

| Měření č. 2 – slitina Zn430 – přítlačná pružina | | | |
|---|--------------|--|---|
| Číslo rozsahu teplot | Teplota [°C] | Dilatace (smrštění) teplot Δl [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti α [K ⁻¹] |
| 1 | 400-450 | -9,25.10 ⁻⁴ | -1,17.10 ⁻⁷ |
| 2 | 350-400 | -3,03.10 ⁻³ | -3,86.10 ⁻⁷ |
| 3 | 300-350 | -0,1432 | -1,82.10 ⁻⁵ |
| 4 | 250-300 | -0,3239 | -4,12.10 ⁻⁵ |
| 5 | 200-250 | -0,5213 | -6,64.10 ⁻⁵ |
| 6 | 150-200 | -0,7263 | -9,25.10 ⁻⁵ |
| 7 | 100-150 | -0,9297 | -1,18.10 ⁻⁴ |
| 8 | 50-100 | -1,1110 | -1,41.10 ⁻⁴ |
| 9 | 50-500 | -0,9433 | -1,20.10 ⁻⁴ |

Tabulka 3-5 Hodnoty součinitele teplotní dilatace (smrštivosti) α získané na základě chladnutí odlitku slitiny Zn430 včetně teplotního rozsahu a hodnoty dilatace.

| Měření č. 3 – slitina Zn430 – přítlačná pružina | | | |
|---|--------------|--|---|
| Číslo rozsahu teplot | Teplota [°C] | Dilatace (smrštění) teplot Δl [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti α [K ⁻¹] |
| 1 | 400-450 | -0,0019 | -2,42.10 ⁻⁷ |
| 2 | 350-400 | -0,0003 | -4,06.10 ⁻⁸ |
| 3 | 300-350 | -0,1325 | -1,68.10 ⁻⁵ |
| 4 | 250-300 | -0,3112 | -3,96.10 ⁻⁵ |
| 5 | 200-250 | -0,5020 | -6,39.10 ⁻⁵ |
| 6 | 150-200 | -0,7015 | -8,93.10 ⁻⁵ |
| 7 | 100-150 | -0,9018 | -1,14.10 ⁻⁴ |
| 8 | 50-100 | -1,0840 | -1,38.10 ⁻⁴ |
| 9 | 50-500 | -0,9339 | -1,18.10 ⁻⁴ |

Tabulka 3-6 Hodnoty součinitele teplotní dilatace (smrštivosti) α získané na základě chladnutí odlitku slitiny Zn430 včetně teplotního rozsahu a hodnoty dilatace.

| Měření č. 4 – slitina Zn430 – bez přitlačné pružiny | | | |
|---|--------------|---|---|
| Číslo rozsahu teplot | Teplota [°C] | Dilatace (smrštění) teplot Δl [mm] | Součinitel teplotní roztlačnosti α [K ⁻¹] |
| 1 | 400-450 | $-1,4 \cdot 10^{-3}$ | $-1,78 \cdot 10^{-7}$ |
| 2 | 350-400 | $-7,61 \cdot 10^{-2}$ | $-9,70 \cdot 10^{-6}$ |
| 3 | 300-350 | -0,3644 | $-4,64 \cdot 10^{-5}$ |
| 4 | 250-300 | -0,5691 | $-7,24 \cdot 10^{-5}$ |
| 5 | 200-250 | -0,7907 | $-1,00 \cdot 10^{-4}$ |
| 6 | 150-200 | -1,0068 | $-1,28 \cdot 10^{-4}$ |
| 7 | 100-150 | -1,2182 | $-1,55 \cdot 10^{-4}$ |
| 8 | 50-100 | -1,4057 | $-1,79 \cdot 10^{-4}$ |
| 9 | 50-500 | -1,2639 | $-1,79 \cdot 10^{-4}$ |

Tabulka 3-7 Hodnoty součinitele teplotní dilatace (smrštivosti) α získané na základě chladnutí odlitku slitiny Zn430 včetně teplotního rozsahu a hodnoty dilatace.

| Měření č. 5 – slitina Zn430 – bez přitlačné pružiny | | | |
|---|--------------|---|---|
| Číslo rozsahu teplot | Teplota [°C] | Dilatace (smrštění) teplot Δl [mm] | Součinitel teplotní roztlačnosti α [K ⁻¹] |
| 1 | 400-450 | $-2,55 \cdot 10^{-8}$ | $-3,24 \cdot 10^{-12}$ |
| 2 | 350-400 | -0,0643 | $-8,19 \cdot 10^{-6}$ |
| 3 | 300-350 | -0,3354 | $-4,27 \cdot 10^{-5}$ |
| 4 | 250-300 | -0,5753 | $-7,32 \cdot 10^{-5}$ |
| 5 | 200-250 | -0,8025 | $-1,02 \cdot 10^{-4}$ |
| 6 | 150-200 | -1,0294 | $-1,31 \cdot 10^{-4}$ |
| 7 | 100-150 | -1,2543 | $-1,59 \cdot 10^{-4}$ |
| 8 | 50-100 | -1,4436 | $-1,83 \cdot 10^{-4}$ |
| 9 | 50-500 | -1,3064 | $-1,66 \cdot 10^{-4}$ |

Tabulka 3-8 Hodnoty součinitele teplotní dilatace (smrštivosti) α získané na základě chladnutí odlitku slitiny Zn430 včetně teplotního rozsahu a hodnoty dilatace.

| Měření č. 6 – slitina Zn430 – bez přitlačné pružiny | | | |
|---|--------------|--|---|
| Číslo rozsahu teplot | Teplota [°C] | Dilatace (smrštění) teplot Δl [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti α [K ⁻¹] |
| 1 | 400-450 | $-2,53 \cdot 10^{-3}$ | $-3,22 \cdot 10^{-7}$ |
| 2 | 350-400 | $-9,93 \cdot 10^{-2}$ | $-1,26 \cdot 10^{-5}$ |
| 3 | 300-350 | -0,4248 | $-5,41 \cdot 10^{-5}$ |
| 4 | 250-300 | -0,6395 | $-8,14 \cdot 10^{-5}$ |
| 5 | 200-250 | -0,9282 | $-1,18 \cdot 10^{-4}$ |
| 6 | 150-200 | -1,2223 | $-1,55 \cdot 10^{-4}$ |
| 7 | 100-150 | -1,4749 | $-1,87 \cdot 10^{-4}$ |
| 8 | 50-100 | -1,7018 | $-2,16 \cdot 10^{-4}$ |
| 9 | 50-500 | -1,6374 | $-2,08 \cdot 10^{-4}$ |

Tabulka 3-9 Hodnoty součinitele teplotní dilatace (smrštivosti) α získané na základě chladnutí odlitku slitiny ZnAl14Cu1 včetně teplotního rozsahu a hodnoty dilatace.

| Měření č. 1 – slitina Zn410 – bez přitlačné pružiny | | | |
|---|--------------|--|---|
| Číslo rozsahu teplot | Teplota [°C] | Dilatace (smrštění) teplot Δl [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti α [K ⁻¹] |
| 1 | 400-450 | - | - |
| 2 | 350-400 | -0,1017 | $-1,29 \cdot 10^{-5}$ |
| 3 | 300-350 | -0,3270 | $-4,16 \cdot 10^{-5}$ |
| 4 | 250-300 | -0,5741 | $-7,31 \cdot 10^{-5}$ |
| 5 | 200-250 | -0,7698 | $-9,80 \cdot 10^{-5}$ |
| 6 | 150-200 | -1,0139 | $-1,29 \cdot 10^{-4}$ |
| 7 | 100-150 | -1,2377 | $-1,57 \cdot 10^{-4}$ |
| 8 | 50-100 | -1,3714 | $-1,74 \cdot 10^{-4}$ |
| 9 | 50-500 | -1,1160 | $-1,42 \cdot 10^{-4}$ |

Tabulka 3-10 Hodnoty součinitele teplotní dilatace (smrštivosti) α získané na základě chladnutí odlitku slitiny ZnAl14Cu1 včetně teplotního rozsahu a hodnoty dilatace.

| Měření č. 2 – slitina Zn410 – bez přitlačné pružiny | | | |
|---|--------------|--|---|
| Číslo rozsahu teplot | Teplota [°C] | Dilatace (smrštění) teplot Δl [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti α [K ⁻¹] |
| 1 | 400-450 | - | - |
| 2 | 350-400 | -0,0708 | $-9,02 \cdot 10^{-6}$ |
| 3 | 300-350 | -0,3268 | $-4,16 \cdot 10^{-5}$ |
| 4 | 250-300 | -0,5549 | $-7,06 \cdot 10^{-5}$ |
| 5 | 200-250 | -0,7653 | $-9,75 \cdot 10^{-5}$ |
| 6 | 150-200 | -0,9702 | $-1,23 \cdot 10^{-4}$ |
| 7 | 100-150 | -1,1644 | $-1,48 \cdot 10^{-4}$ |
| 8 | 50-100 | -1,2840 | $-1,63 \cdot 10^{-4}$ |
| 9 | 50-500 | -1,0687 | $-1,36 \cdot 10^{-4}$ |

Tabulka 3-11 Hodnoty součinitele teplotní dilatace (smrštivosti) α získané na základě chladnutí odlitku slitiny ZnAl14Cu1 včetně teplotního rozsahu a hodnoty dilatace.

| Měření č. 3 – slitina Zn410 – bez přitlačné pružiny | | | |
|---|--------------|--|---|
| Číslo rozsahu teplot | Teplota [°C] | Dilatace (smrštění) teplot Δl [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti α [K ⁻¹] |
| 1 | 400-450 | - | - |
| 2 | 350-400 | $-6,6093 \cdot 10^{-2}$ | $-8,41 \cdot 10^{-6}$ |
| 3 | 300-350 | $-3,0810 \cdot 10^{-1}$ | $-3,92 \cdot 10^{-5}$ |
| 4 | 250-300 | $-5,0280 \cdot 10^{-1}$ | $-6,40 \cdot 10^{-5}$ |
| 5 | 200-250 | $-7,3783 \cdot 10^{-1}$ | $-9,39 \cdot 10^{-5}$ |
| 6 | 150-200 | $-9,4882 \cdot 10^{-1}$ | $-1,20 \cdot 10^{-4}$ |
| 7 | 100-150 | -1,1606 | $-1,47 \cdot 10^{-4}$ |
| 8 | 50-100 | -1,2871 | $-1,63 \cdot 10^{-4}$ |
| 9 | 50-500 | -1,1194 | $-1,42 \cdot 10^{-4}$ |

Tabulka 3-12 Hodnoty součinitele teplotní dilatace (smrštivosti) α získané na základě chladnutí odlitku slitiny ZnAl18Cu1 včetně teplotního rozsahu a hodnoty dilatace.

| Měření č. 1 – slitina Zn830 – bez přitlačné pružiny | | | |
|---|--------------|---|---|
| Číslo rozsahu teplot | Teplota [°C] | Dilatace (smrštění) teplot Δl [mm] | Součinitel teplotní roztlačnosti α [K ⁻¹] |
| 1 | 400-450 | - | - |
| 2 | 350-400 | -0,1272 | -1,62.10 ⁻⁵ |
| 3 | 300-350 | -0,4017 | -5,11.10 ⁻⁵ |
| 4 | 250-300 | -0,6224 | -7,92.10 ⁻⁵ |
| 5 | 200-250 | -0,9380 | -1,19.10 ⁻⁴ |
| 6 | 150-200 | -1,2288 | -1,56.10 ⁻⁴ |
| 7 | 100-150 | -1,4783 | -1,88.10 ⁻⁴ |
| 8 | 50-100 | -1,6242 | -2,06.10 ⁻⁴ |
| 9 | 50-500 | -1,2707 | -1,61.10 ⁻⁴ |

Tabulka 3-13 Hodnoty součinitele teplotní dilatace (smrštivosti) α získané na základě chladnutí odlitku slitiny ZnAl18Cu1 včetně teplotního rozsahu a hodnoty dilatace.

| Měření č. 2 – slitina Zn830 – bez přitlačné pružiny | | | |
|---|--------------|---|---|
| Číslo rozsahu teplot | Teplota [°C] | Dilatace (smrštění) teplot Δl [mm] | Součinitel teplotní roztlačnosti α [K ⁻¹] |
| 1 | 400-450 | - | - |
| 2 | 350-400 | -0,1190 | -1,51.10 ⁻⁵ |
| 3 | 300-350 | -0,3998 | -5,09.10 ⁻⁵ |
| 4 | 250-300 | -0,6300 | -8,02.10 ⁻⁵ |
| 5 | 200-250 | -0,9373 | -1,19.10 ⁻⁴ |
| 6 | 150-200 | -1,2290 | -1,56.10 ⁻⁴ |
| 7 | 100-150 | -1,4942 | -1,90.10 ⁻⁴ |
| 8 | 50-100 | -1,6367 | -2,08.10 ⁻⁴ |
| 9 | 50-500 | -1,4173 | -1,80.10 ⁻⁴ |

Tabulka 3-14 Hodnoty součinitele teplotní dilatace (smrštivosti) α získané na základě chladnutí odlitku slitiny ZnAl18Cu1 včetně teplotního rozsahu a hodnoty dilatace.

| Měření č. 3 – slitina Zn830 – bez přitlačné pružiny | | | |
|---|--------------|--|---|
| Číslo rozsahu teplot | Teplota [°C] | Dilatace (smrštění) teplot Δl [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti α [K ⁻¹] |
| 1 | 400-450 | 0 | 0 |
| 2 | 350-400 | -0,1706 | $-2,17425 \cdot 10^{-5}$ |
| 3 | 300-350 | -0,2995 | $-3,81529 \cdot 10^{-5}$ |
| 4 | 250-300 | -0,541 | $-6,89172 \cdot 10^{-5}$ |
| 5 | 200-250 | -0,8533 | $-1,08704 \cdot 10^{-4}$ |
| 6 | 150-200 | -1,1634 | $-1,48212 \cdot 10^{-4}$ |
| 7 | 100-150 | -1,4469 | $-1,84322 \cdot 10^{-4}$ |
| 8 | 50-100 | -1,6007 | $-2,03923 \cdot 10^{-4}$ |
| 9 | 50-500 | -1,3596 | $-1,73199 \cdot 10^{-4}$ |

Tabulka 3-15 Hodnoty součinitele teplotní dilatace (smrštivosti) α získané na základě chladnutí odlitku slitiny ZnAl11Cu1 včetně teplotního rozsahu a hodnoty dilatace.

| Měření č. 1 – slitina Zn 1110 – bez přitlačné pružiny | | | |
|---|--------------|--|---|
| Číslo rozsahu teplot | Teplota [°C] | Dilatace (smrštění) teplot Δl [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti α [K ⁻¹] |
| 1 | 400-450 | - | - |
| 2 | 350-400 | -0,0944 | $-1,20 \cdot 10^{-5}$ |
| 3 | 300-350 | -0,3466 | $-4,41 \cdot 10^{-5}$ |
| 4 | 250-300 | -0,547 | $-6,96 \cdot 10^{-5}$ |
| 5 | 200-250 | -0,8065 | $-1,02 \cdot 10^{-4}$ |
| 6 | 150-200 | -1,0351 | $-1,31 \cdot 10^{-4}$ |
| 7 | 100-150 | -1,2530 | $-1,59 \cdot 10^{-4}$ |
| 8 | 50-100 | -1,3821 | $-1,76 \cdot 10^{-4}$ |
| 9 | 50-500 | -1,1083 | $-1,41 \cdot 10^{-4}$ |

Tabulka 3-16 Hodnoty součinitele teplotní dilatace (smrštivosti) α získané na základě chladnutí odlitku slitiny ZnAl11Cu1 včetně teplotního rozsahu a hodnoty dilatace.

| Měření č. 2 – slitina Zn 1110 – bez přitlačné pružiny | | | |
|---|--------------|--|---|
| Číslo rozsahu teplot | Teplota [°C] | Dilatace (smrštění) teplot Δl [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti α [K ⁻¹] |
| 1 | 400-450 | - | - |
| 2 | 350-400 | -0,0805 | $-1,02 \cdot 10^{-5}$ |
| 3 | 300-350 | -0,3284 | $-4,18 \cdot 10^{-5}$ |
| 4 | 250-300 | -0,5238 | $-6,67 \cdot 10^{-5}$ |
| 5 | 200-250 | -0,7779 | $-9,90 \cdot 10^{-5}$ |
| 6 | 150-200 | -1,0099 | $-1,28 \cdot 10^{-4}$ |
| 7 | 100-150 | -1,2358 | $-1,57 \cdot 10^{-4}$ |
| 8 | 50-100 | -1,3719 | $-1,74 \cdot 10^{-4}$ |
| 9 | 50-500 | -1,1724 | $-1,49 \cdot 10^{-4}$ |

Tabulka 3-17 Hodnoty součinitele teplotní dilatace (smrštivosti) α získané na základě chladnutí odlitku slitiny ZnAl11Cu1 včetně teplotního rozsahu a hodnoty dilatace.

| Měření č. 3 – slitina Zn 1110 – bez přitlačné pružiny | | | |
|---|--------------|--|---|
| Číslo rozsahu teplot | Teplota [°C] | Dilatace (smrštění) teplot Δl [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti α [K ⁻¹] |
| 1 | 400-450 | - | - |
| 2 | 350-400 | -0,0713 | $-9,08 \cdot 10^{-6}$ |
| 3 | 300-350 | -0,2985 | $-3,80 \cdot 10^{-5}$ |
| 4 | 250-300 | -0,5225 | $-6,65 \cdot 10^{-5}$ |
| 5 | 200-250 | -0,7159 | $-9,12 \cdot 10^{-5}$ |
| 6 | 150-200 | -0,9615 | $-1,22 \cdot 10^{-4}$ |
| 7 | 100-150 | -1,1886 | $-1,51 \cdot 10^{-4}$ |
| 8 | 50-100 | -1,3173 | $-1,67 \cdot 10^{-4}$ |
| 9 | 50-500 | -1,1631 | $-1,48 \cdot 10^{-4}$ |

3.4.2 Zhodnocení výsledků

Grafické závislosti odlévání slitiny zinku Zn430 s tlačnou pružinou, viz obr. 3-13 až 3-15

Z grafických závislostí experimentu 1) viz na obr. 3-13 (odlévání slitiny zinku Zn430) se zatížení tlačnou pružinou je zřejmé, že teplota krystalizace slitiny zinku je 380°C a z celkové délky zkušební vzorku je 0,86 % smrštění to odpovídá délce smrštění 1,35mm.

Z grafických závislostí experimentu 2) viz na obr. 3-14 (odlévání slitiny zinku Zn430) se zatížení tlačnou pružinou je zřejmé, že teplota krystalizace slitiny zinku probíhá v intervalu $400 - 370^{\circ}\text{C}$ a z celkové délky zkušební vzorku je 0,99 % smrštění to odpovídá délce smrštění 1,56mm.

Z grafických závislostí experimentu 3) viz na obr. 3-15 (odlévání slitiny zinku Zn430) se zatížení tlačnou pružinou je zřejmé, že teplota krystalizace slitiny zinku probíhá v intervalu $400 - 370^{\circ}\text{C}$ a z celkové délky zkušební vzorku je 0,88 % smrštění to odpovídá délce smrštění 1,38mm.

Grafické závislosti odlévání slitiny zinku Zn430 bez tlačné pružiny, viz obr. 3-16 až 3-18

Z grafických závislostí experimentu 1) viz na obr. 3-16 (odlévání slitiny zinku Zn430) bez zátěže tlačné pružiny je zřejmé, že teplota krystalizace slitiny zinku probíhá v intervalu $400 - 370^{\circ}\text{C}$ a z celkové délky zkušební vzorku je 1,02 % smrštění to odpovídá délce smrštění 1,6mm.

Z grafických závislostí experimentu 2) viz na obr. 3-17 (odlévání slitiny zinku Zn430) bez zátěže tlačné pružiny je zřejmé, že teplota krystalizace slitiny zinku probíhá v intervalu $400 - 370^{\circ}\text{C}$ a z celkové délky zkušební vzorku je 1 % smrštění to odpovídá délce smrštění 1,6 mm.

Z grafických závislostí experimentu 3) viz na obr. 3-18 (odlévání slitiny zinku Zn430) bez zátěže tlačné pružiny je zřejmé, že teplota krystalizace slitiny zinku probíhá v intervalu $400 - 370^{\circ}\text{C}$ a z celkové délky zkušební vzorku je 1,27 % smrštění to odpovídá délce smrštění 2 mm.

Grafické závislosti odlévání slitiny zinku ZnAl14Cu1 bez tlačné pružiny, viz obr. 3-19 až 3-21

Z grafických závislostí experimentu 4) viz na obr. 3-19 (odlívání slitiny zinku ZnAl14Cu1) bez zátěže tlačné pružiny je zřejmé, že teplota krystalizace slitiny zinku je 389°C a z celkové délky zkušebního vzorku je 1,1% smrštění to odpovídá délce smrštění 1,74 mm.

Z grafických závislostí experimentu 5) viz na obr. 3-20 (odlívání slitiny zinku ZnAl14Cu1) bez zátěže tlačné pružiny je zřejmé, že teplota krystalizace slitiny zinku je 389°C a z celkové délky zkušebního vzorku je 0,99 % smrštění to odpovídá délce smrštění 1,56 mm.

Z grafických závislostí experimentu 5) viz na obr. 3-21 (odlívání slitiny zinku ZnAl14Cu1) bez zátěže tlačné pružiny je zřejmé, že teplota krystalizace slitiny zinku je 370°C a z celkové délky zkušebního vzorku je 1 % smrštění to odpovídá délce smrštění 1,58 mm.

Grafické závislosti odlévání slitiny zinku ZnAl18Cu1 bez tlačné pružiny, viz obr. 3-22 až 3-24

Z grafických závislostí experimentu 6) viz na obr. 3-22 (odlívání slitiny zinku ZnAl18Cu1) bez zátěže tlačné pružiny je zřejmé, že teplota krystalizace slitiny zinku je 380°C a z celkové délky zkušebního vzorku je 1,15 % smrštění to odpovídá délce smrštění 1,8 mm.

Z grafických závislostí experimentu 7) viz na obr. 3-23 (odlívání slitiny zinku ZnAl18Cu1) bez zátěže tlačné pružiny je zřejmé, že teplota krystalizace slitiny zinku probíhá v intervalu 400 - 380°C a z celkové délky zkušebního vzorku je 1,15 % smrštění to odpovídá délce smrštění 1,8 mm.

Z grafických závislostí experimentu 8) viz na obr. 3-24 (odlívání slitiny zinku ZnAl18Cu1) bez zátěže tlačné pružiny je zřejmé, že teplota krystalizace slitiny zinku je 370°C a z celkové délky zkušebního vzorku je 1,24 % smrštění to odpovídá délce smrštění 1,94 mm.

Grafické závislosti odlévání slitiny zinku ZnAl11Cu1 bez tlačné pružiny, viz obr. 3-25 až 3-27

Z grafických závislostí experimentu 9) viz na obr. 3-25 (odlívání slitiny zinku ZnAl1Cu1) bez zátěže tlačné pružiny je zřejmé, že teplota krystalizace slitiny zinku je 380°C z celkové délky zkušebního vzorku je 1 % smrštění to odpovídá délce smrštění 1,6mm.

Z grafických závislostí experimentu 10) viz na obr. 3-26 (odlívání slitiny zinku ZnAl4Cu1) bez zátěže tlačné pružiny je zřejmé, že teplota krystalizace slitiny zinku je 380°C a z celkové délky zkušebního vzorku je 1,12% smrštění to odpovídá délce smrštění 1,75 mm.

Z grafických závislostí experimentu 11) viz na obr. 3-27 (odlívání slitiny zinku ZnAl4Cu1) bez zátěže tlačné pružiny je zřejmé, že teplota krystalizace slitiny zinku je 380°C z celkové délky zkušebního vzorku je 1,12% smrštění to odpovídá délce smrštění 1,76 mm.

4. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výsledky obsažené v této diplomové práci přináší dílčí informace o chování vybraných slitiny zinku při tuhnutí a chladnutí odlitků ve tvaru trhač tyče. Tento tvar odlitku přispívá ke sledování dilatace (smrštění) se kterým je možno uvažovat i při výrobě odlitků složitých tvarů.

Pro tento typ experimentu je nutné použít speciální zařízení, které umožňuje zároveň sledovat dilataci a měřit teploty v tepelné ose odlitků. Toto měřicí zařízení se skládá z měřicího rámu, jehož součástí je dutina formy, která je tvořena ocelovými tvarovými příločkami ve střední partii formy a kovové části okraje formy. Jeho součástí je zařízení, které se nazývá dilatometr s převodníkem a je propojeno s PC. Toto zařízení bylo zkonstruováno za účelem řešení výzkumných prací, které se zabývají sledováním vlastností zinku a jeho slitin.

Je nutné zdůraznit, že podobné experimenty prováděné s taveninou kovu jsou velmi náročné a vyžadují specifické ošetření taveniny (modifikaci a rafinaci). Před odléváním včetně odstranění nečistot, také následné měření teploty před odléváním do formy, aby byly zajištěny stejné podmínky pro všechny experimenty. Tyto zásady při odlévání do formy byly navrženy

podle Bočvara a Sviderského (odlitek je poměrně malý a tuhne velkou rychlostí, zejména při odlévání slitin zinku).

Pro toto odvětví se zdá být orientační výpočet mezi poměrem teplot, tání a poměrem dilatace u těchto zinkových slitin. Poměr mezi teplotami krystalizace těchto materiálů je 1,66 mm. V této souvislosti je třeba dodat, že slitiny zinku krystalizují v hexagonální soustavě. Součinitel teplotní roztažnosti čistého zinku $\alpha = 23,8 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$. Pokud se týká sledování lineárního smrštění odlitků při jejich chladnutí, tak na délku 1000 mm se slitiny zinku smrští o 16,6 mm. Pokud bychom tuto úvahu využili při ověřování naměřených hodnot smrštění odlitků při jejich tuhnutí, přesněji u chladnutí. Lze vypočítat, že sledovaný odlitek měl 157 mm a měl by se smrstit o hodnotu 2,8 mm.

Na součinitel α , které byly orientačně vypočítány na základě experimentálních výsledků, je třeba nahlížet pouze orientačně, neboť byla snaha rozšířit naše poznatky, které se týkají sledování chladnutí a tuhnutí odlitků z neželezných kovů. Pro více odpovídajících hodnot α je třeba provádět experimenty, které by vykazovaly přehledné výpočty teplot. Odlévání do formy dle Bočvara a Sviderského vedlo k rychlému chladnutí a tuhnutí odlitků a křivek teplot měla strmější charakter. Současně také by bylo vhodné provádět experimenty pro široký interval časů chladnutí odlitků, aby křivka chladnutí odlitku vykazovala i teploty okolí. Na základě provedených experimentů lze získat křivky časových závislostí smrštění a teploty. Tyto křivky svým charakterem se přibližují skutečnosti. Je třeba podotknout, že je nutno vzít v úvahu vliv okolního prostředí, který zde hraje velkou roli. Pokud bychom chtěli ideálně odlévat dané odlitky museli bychom být uzavřeni v nějaké místnosti, kde by byla konstantní teplota a nedocházelo by k těmto výkyvům. Proto i při provádění těchto experimentů byla sledována teplota okolí a bylo dbáno, aby experimenty probíhaly za pokud možno stejných podmínek.

5. ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla zpracována na téma: „Sledování rozměrových změn během tuhnutí odlitků ze slitiny zinku“, které se označují ve slévárenském průmyslu jako „ZAMAK“. Práce je rozdělena do dvou částí rešeršní a experimentální. V rešeršní části jsou shrnuty základní poznatky o zinku a jeho slitinách, o krystalizaci a tuhnutí odlitků s ohledem na dilatační vlastnosti. Poznatky získané při zpracování rešeršní práce byly aplikovány na následující popis hodnot získaných experimentů přihlédnutím na daný materiál odlitku, druh slévárenské formy a teplotní parametry lití (teplota lití, teplota formy).

Experimentální část zahrnuje experimenty, které byly prováděny za účelem sledování dilatace, resp. smršťování odlitků ze slitin zinku Zn 430 a Zn 410 odlévaných při různých podmínkách. Následně z experimentálně zjištěných hodnot byly stanoveny součinitelé teplotní smrštivosti tuhnoucího odlitku z výše použitých slitin pro určité rozmezí teplot. Tvar použitého odlitku je patrný z obr. 3-12. Pro experimenty bylo použito měřicí zařízení, které je k dispozici na pracovišti Katedry strojírenské technologie.

Na základě získaných poznatků při řešení této diplomové práce části lze formulovat tyto dílčí závěry:

1. Použité měřicí zařízení (CRYSTALDIAGRAPH PC-4T2L dilatometr, měřicí rám a PC se softwarem ATD). Při dodržování přesných podmínek experimentu, je dostačující pro sledování dilatometrických charakteristik na zkušebním odlitku ve tvaru trhací tyče. Užitečným softwarem byl ATD pro záznam naměřených dat. Tento software umožňuje získat potřebné závislosti $T = f(t)$ a $\Delta L = \Delta L(t)$ a jeho schopnost dodat hodnoty první a druhé derivace vyšetřovaných průběhů.
2. Při prováděných experimentech, bylo dbáno na zachování co největší přesnosti, tak aby získané výsledky plně korespondovaly s případnou opakovatelností experimentů. Snaha o získání co největší přesnosti dilatometrického měření slitiny zinku Zn430. Hodnota průměrné absolutní dilatace, resp. smrštění činila 1,62 mm. Tímto byl do jisté míry potvrzen předpoklad, že slitiny zinku s vyšším obsahem mědi vykazují vyšší rozměrovou stabilitu a tedy, že obsah mědi ve slitinách zinku ovlivňuje smrštění.

3. Porovnání zinkových slitin

Zn430 s tlačnou pružinou při průměrné teplotě krystalizace 385 °C bylo sledováno průměrné smrštění 1,43 mm.

Zn430 bez tlačné pružiny při průměrné teplotě krystalizace 385 °C bylo sledováno průměrné smrštění 1,73 mm.

ZnAl4Cu1 bez tlačné pružiny při průměrné teplotě krystalizace 388 °C bylo sledováno průměrné smrštění 1,62 mm.

ZnAl18Cu1 bez tlačné pružiny při průměrné hodnotě krystalizace 378 °C bylo sledováno průměrné smrštění 1,84 mm.

ZnAl11Cu1 bez tlačné pružiny při průměrné hodnotě krystalizace 280 °C bylo sledováno průměrné smrštění 1,70 mm.

4. Průměrné hodnoty součinitelů smrštivosti pro slitiny Zn 430, Zn 410, Zn 880, Zn 1100 činily pro teplotní rozmezí 450 až 50 °C: Zn 430 s přítlačnou pružinou $\alpha = -6,39 \cdot 10^{-5} [\text{K}^{-1}]$, Zn 430 bez přítlačné pružiny $\alpha = -1,02 \cdot 10^{-4} [\text{K}^{-1}]$, Zn 410 $\alpha = -8,89 \cdot 10^{-5} [\text{K}^{-1}]$, Zn 830 $\alpha = -1,08 \cdot 10^{-4} [\text{K}^{-1}]$, Zn 1110 $\alpha = -9,11 \cdot 10^{-5} [\text{K}^{-1}]$.

5. Slitiny zinek mají mnohem lepší vlastnosti oproti hliníkovým slitinám, jak po stránce mechanických, tak především po stránce slévarenských. Ze slitin zinku se vyrábějí nejsložitější součásti jako: automobilové karburátory. Nesmíme opomenout, že se odlévají především menší rozměry a to díky tomu, že je zinek 2,4 x těžší než hliník. Bohužel zinek má větší hmotnost proti hliníku.

Z důvodu, že se jednalo o základní výzkum, není zde v diplomové práci zahrnuto ekonomické hodnocení. Další experimenty navrhuji provádět s různou hodnotou teploty přehřátí odlévané taveniny. Nebo provádět experimenty s bržděním smrštěním.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PTÁČEK, L., USTOHAL, V.: Slitiny zinku pro odlitky. Slévárenství XLIX, 2001, č. 4. 203 – 208.
- [2] KRÝSLOVÁ, S.: Sledování slévárenských vlastností slitin zinku pro výrobu odlitků. [Doktorská práce]. KSP – FS, TU v Liberci 2008.
- [3] COPE, M. A.: Zinc pressure die-casting - the metal flow system. 1. edition. Australian Zinc Development Association, 1979.
- [4] HERMAN, E. A.: Dimensional repeatability of the Die Casting Process. Australian Die Casting Association, 2000.
- [5] Podklady firmy FRENCH (Canada)
- [6] Podklady firmy Tenza Adamov (Česká Republika)
- [7] Podklady firmy Eastern Alloys, Inc. (USA)
- [8] Podklady firmy TECKAST (USA)
- [9] Podklady firmy ALFE Brno (Česká Republika)
- [10] Podklady firmy TEOLI spol. s r.o (Česká Republika)
- [11] Zinek (<http://miroslav-enciklopedie.blogspot.com/2009/06/zinek.html>)
- [12] <http://www.tenza-slevarna.cz/cz/zinkove-odlitky/>
- [13] VETIŠKA, A.: Teoretické základy slévárenské technologie, 2.vydání, SNTL Praha, 1974.
- [14] NOVOTNÝ, J., ŠANOVEC, J., BEDNÁŘ, B., KREIBICH, V.: Technologie I [Skripta]. FS - ČVUT, Praha 1999.
- [15] PÍŠEK, F., JENÍČEK, L., RYŠ, P.: Nauka o materiálu I., 3. svazek 2.vydání, ACADEMIA, 1973.
- [16] VALECKÝ, J.: Lití kovů pod tlakem, 1.vydání, Praha, 1963
- [17] MICHNA a kol.: Encyklopedie hliníku. Adin, Prešov, 2005. str. 162-218
- [18] <http://www.elektronn.cz/produkty/slevarna.htm>
- [19] GRÍGEROVÁ, T., LUKÁČ, I., KOŘENÝ, R.: Zlívárenstvo neželezných kovov, 1.vydání, Bratislava/Praha 1988.
- [20] GRÍGEROVÁ, T., LUKÁČ, I., KOŘENÝ, R.: Zlívárenstvo neželezných kovov, 1.vydání, Bratislava/Praha 1988.
- [21] <http://vyprodejskladu.com/content/8-popis-vyroby>